

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Wille Halmesmäki

**OIKOSULKUMOOTTORIN LAATUVIRHEIDEN JÄLJITTÄMINEN KOESTUSTULOSTEN PERUSTEELLA**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 05.02.2010

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Jouni Ikäheimo

Työn tarkistaja

Bertil Brännbacka

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö tehtiin Vaasan ABB Oy Motorsin tuotekehitysosastolle, haluaisin kiittää mielenkiintoisesta aiheesta tuotekehityspäällikkö Jouni Ikäheimoa ja lisäksi tuotekehitysosaston henkilökuntaa, joka avusti moottorien vikojen selvityksessä. Vaasan yliopistolta haluan kiittää professori Timo Vekaraa neuvoista ja avusta tekstin kanssa sekä Bertil Brännbackaa työn tarkistuksesta. Lopuksi kiitos perheelle ja ystäville jotka ovat auttaneet tekstin korjauksissa ja muotoilussa sekä kannustaneet koko opiskelun ajan.

Vaasassa 28.01.2010

Wille Halmesmäki

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1. JOHDANTO	9
2. OIKOSULKUMOOTTORI	11
2.1. Staattorikäänitys	12
2.2. Magneettiipiiri	13
2.3. Roottorikäänitys	14
2.3.1. Vääntömomentti	15
2.3.2. Roottoriuramuodot	16
2.3.3. Tahti- ja epätahtivääntömomentit	20
2.4. Oikosulkumoottorin magneettinen ääni	24
2.5. Häviöt	27
2.5.1. Rautahäviöt	27
2.5.2. Kuparihäviöt	29
2.5.3. Lisähäviöt	29
2.6. Lämmönsiirto	30
2.6.1. Johtuminen	30
2.6.2. Pakotettu konvektio	31
2.6.3. Oikosulkumoottorin lämpenemä	32
3. OIKOSULKUMOOTTORIN KOESTUKSET	34
3.1. Vaiheiden vastusmittaus	35
3.2. Eristysvastuskoe	35
3.3. Eristyskoe	36
3.4. Toistoaltokoe	37
3.5. Tyhjäkäyntikoe	39
3.6. Oikosulkukoe	39
3.7. Tärinäspektrimittaus	40
3.8. Lämpenemäkoe	40
4. OIKOSULKUMOOTTOREIDEN KOMPONENTTIEN VIKAANTUMINEN	42
4.1. Eristeet	43
4.2. Kuparikäänitys	44
4.3. Magneettivuon rautapiiri	45
4.4. Ilmaväli	46
4.5. Roottorin häkkikäänitys	47
4.6. Lämmönsiirto	47
4.7. Yhteenvedo	49

5.	MITTAUSTULOSTEN TULKINTA	51
5.1.	Tyhjäkäyntikokeen sijaiskytkentä ja tulkinta	51
5.2.	Oikosulkukokeen sijaiskytkentä ja tulkinta	55
5.3.	Moottorin lämpenemä ja lämpenemäko	57
5.3.1.	Lämpövirran määrä	58
5.3.2.	Jäähdytysilman kulku	59
5.3.3.	Johtuminen ja lämpöresistanssit	60
5.3.4.	Lämmön kulku ja lämpenemäkokeen tulkinta	61
6.	POHDINTA	63
7.	YHTEENVETO	66
	LÄHDELUETTELO	68

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$A$	virtakate
$a$	rinnakkaisten johdinten määrä
$B$	magneettivuon tiheys
$C$	kapasitanssi
$c$	ominaislämpökapasiteetti
$C_{th}$	lämpökapasitanssi
$d$	leveys
$E$	sähkökentän voimakkuus
$f$	taajuus
$h$	konvektion lämmönsiirtokerroin
$H$	magneettikentän voimakkuus
$I$	Sähkövirran voimakkuus
$I_0$	tyhjäkäyntivirta
$I_{km}$	oikosulkuvirta
$J$	virrantiheys
$k_w$	käämityskerroin
$l$	pituus
$L$	induktanssi
$l'$	sähköinen pituus
$M$	massa
$m$	vaiheluku
$N$	käämityskerrosten määrä
$P$	Teho
$P_0$	Tyhjäkäyntiteho
$P_{km}$	Oikosulkuteho
$p$	napapariiluku
$Q$	uraluku
$Q_{th}$	lämpövirta
$r$	säde
$R$	resistanssi
$R_{th}$	lämpöresistanssi

$r_v$	värähtelykuvio
$s$	jättämä
$S$	pinta-ala
$s_1$	staattorin uraluku
$s_2$	roottorin uraluku
$T$	lämpötila
$U$	jännite
$v$	staattorin synnyttämän yliaallon järjestysluku
$V$	tilavuus
$X$	reaktanssi
$Z$	Impedanssi
$\delta$	ilmavälin pituus
$\Theta$	magnetomotorinen voima
$\lambda$	lämmönjohtavuus
$\mu$	roottorin synnyttämän yliaallon järjestysluku
$\Phi$	magneettivuo
$\zeta_r$	roottoriresistanssin ja -reaktanssin välinen kulma
$\rho$	resistiivisyys
$\sigma$	johtavuus
$\omega$	sähköinen kulmanopeus
$\tau$	vääntömomentti
$\tau_p$	napajako
$\tau_{th}$	lämpenemisaikavakio
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NTC	Negative Temperature Coefficient, negatiivinen lämpötila-kerroin

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta****Tekijä:****Wille Halmesmäki****Diplomityön nimi:****Oikosulkumoottorin laatuvirheiden jäljittäminen koestustulosten perusteella****Valvojan nimi:****Prof. Timo Vekara****Ohjaajan nimi:****TkT Jouni Ikäheimo****Tarkastajan nimi:****DI Bertil Brännbacka****Tutkinto:****Diplomi-insinööri****Oppiaine:****Sähkötekniikka****Opintojen aloitusvuosi:****2001****Diplomityön valmistumisvuosi:** **2010****Sivumäärä: 70**

---

**TIIVISTELMÄ**

Tuotannossa oleville oikosulkumoottoreille saadaan satunnaisesti poikkeavia mittaustuloksia. Moottoreiden laadun ja lyhyen toimitusajan kannalta on tärkeää, että havaittu poikkeama kyetään nopeasti yhdistämään sen aiheuttajaan. Osa poikkeamista kyetään selvittämään jo tuotantolinjalla, mutta vaativampien vikojen analysointia pystyy tekemään ainoastaan pätevä sähkösuunnittelija.

Työn lähtökohtana oli ohjeistuksen tekeminen moottorien vikojen analysoinnin avuksi, jotta voidaan poistaa ylimääräistä työtä sähkösuunnittelijoilta ja mahdollisesti myös nopeuttaa vikojen analyysiä. Tämä vaatii selvityksen siitä, mitä vikoja moottorissa voi tuotannossa syntyä ja mitkä näistä vioista vaativat tarkempaa tulkintaa.

Tutkimus tehtiin pääosin tarkastelemalla oikosulkumoottoreiden teoriaa moottorien eri komponenttien ja niiden vikaantumisen kannalta. Apuna käytettiin moottoreille suoritettujen koestusten tuloksia sekä tietokantaa moottoreille uudelleen tilatuista komponenteista ja havaituista poikkeamista.

Työn teoriaosuudessa pyrittiin selvittämään mahdollisimman kattavasti moottorin erilaisiin vikaantumisiin johtavia tekijöitä. Tutkimusosuus jakautuu kolmeen osaan. Aluksi selvitetään, mitkä tekijät aiheuttavat sen, että moottorille saadaan poikkeuksellisia mittaustuloksia. Toisessa osassa selvitetään vikojen havaitsemisen kannalta oleelliset koestukset. Kolmannessa osassa yhdistetään poikkeukselliset mittaustulokset ja niiden aiheuttajat ohjeistukseen.

Tuloksena saatiin ohjeistus laatuvirheiden jäljittämiseen, moottorille yleisesti tehtävien mittausten avulla. Moottoreille tehtävistä koestuksista erityisesti tyhjäkäyntikoe, mutta myös oikosulku- ja lämpenemäko, vaativat tarkkaa tulkintaa. Näiden tulkintaa saadaan helpotettua, kun tarkastellaan vikoja ja mittauksia moottorin sähköisten ja lämmönjohtavuuden suureiden kannalta, toisin sanoen mitä suureita moottoreille suoritettavissa mittauksissa mitataan ja miten erilaiset moottoriviat vaikuttavat näihin suureisiin.

---

**AVAINSANAT:** Oikosulkumoottori, koestus, tyhjäkäyntikoe, oikosulkukoe, lämpenemäko

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology****Author:****Wille Halmesmäki****Topic of the Thesis:****Using factory made tests to trace squirrel cage motor faults****Supervisor:****Prof. Timo Vekara****Instructor:****Dr.Tech. Jouni Ikäheimo****Evaluator:****M.Sc. Bertil Brännbacka****Degree:****Master of Science in Technology****Major of Subject:****Electrical Engineering****Year of Entering the University: 2001****Year of Completing the Thesis: 2010****Pages: 70**

---

**ABSTRACT**

Motors that are tested during the manufacturing process will randomly get abnormal test results. In order to keep good quality and short delivery time it is important to rapidly link the abnormal result to its source. Some of the test results are analyzed right away in the production line, but the more complex ones can only be analyzed by experienced electrical engineers.

The basis for this work was to make an instruction to help the analysis of motor faults. This can decrease the work load of electrical designers and also speed up the analysis of abnormal test results. This requires the investigation of motor faults that can originate from the manufacturing process and also to find out which of these faults require more detailed analysis.

The study was mainly made by investigating squirrel cage induction motor theory from the point of view of different motor components and their possible faults. Also motor test results and information of reordered motor parts and found abnormalities were used.

The theory part of this work consists of squirrel cage motor theory that explains how the different motor components can become faulty. The research part consists of three parts. First part examines the different causes of abnormal test results. Second part searches what are the tests and measurements that can reveal these causes. Third part combines these tests and faults to instruction for squirrel cage motor fault analysis.

The outcome of this work is an instruction for using factory made tests to trace squirrel cage motor faults. From the factory made tests especially the no-load test but also locked rotor and temperature rise tests needed more accurate analysis. The analysis can be made easier when the tests and faults are examined from the point of view of the motor electrical and thermal quantities. In other words, to investigate which quantities are measured in different tests and how different faults effect to these quantities.

---

**KEYWORDS:** Squirrel cage induction motor, testing, locked rotor test, no-load test, temperature rise test



## 1. JOHDANTO

Tuotannossa oleville moottoreille saadaan satunnaisesti poikkeavia mittaustuloksia. Suuri osa koestuksissa havaittavista poikkeamista kyetään suoraan, koestajien toimesta, yhdistämään ne aiheuttaneeseen vikaan, kuten esimerkiksi eristeviat. Vaativampien vikojen analyysiä pystyy tekemään ainoastaan pätevä sähkösuunnittelija. Moottoreiden laadun ja lyhyen toimitusajan kannalta on tärkeää että havaittu poikkeama kyetään nopeasti yhdistämään sen aiheuttajaan.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, mitkä koestukset vaativat tarkempaa tulkintaa sekä helpottaa tulkintaa tekemällä viat ja koestustulokset yhdistävä vuokaavio. Tällöin voidaan poistaa ylimääräisiä töitä sähkösuunnittelijoilta ja mahdollisesti myös nopeuttaa vikojen havaitsemista. Työssä keskitytään pääasiassa ilmajähdytteisten, pienjännitteisten, oikosulkumoottoreiden sähkövikoihin sekä lämmönsiirtoon liittyviin vikoihin.

Moottorin laaduntarkkailussa havainnoijina ovat mittauksia suorittavat koestajat. Koestuksia suoritetaan valmistuslinjoilla sekä koestuskentällä. Valmistuslinjoilla tehtävät koestukset koskevat kaikkia sieltä valmistuvia moottoreita. Koestuskentällä koestetaan tiettyjä, sinne valittuja moottoreita. Linjalla tehtävien koestusten tarkoitus on tarkistaa että moottoreilta mitattaviksi valitut sähköiset arvot asettuvat niille asetettujen raja-arvojen väliin. Koestuskentällä tehtävien koestusten tarkoitus ei ole ainoastaan laadun valvonta vaan pääasiassa dokumentoida moottorin tiedot, esimerkiksi jotta nähdään että moottori läpäisee jonkin standardin. Tuotantolinjalla tehtävien koestusten on oltava nopeita ja melko yksinkertaisia, koska ne tehdään jokaiselle moottorille. Enemmän aikaa vievät ja vaativimmat koestukset, esimerkiksi kuormakoneen vaativa vääntömomenttikäyrien mittaustulos, sekä lämpenemäkoet suoritetaan koekentällä.

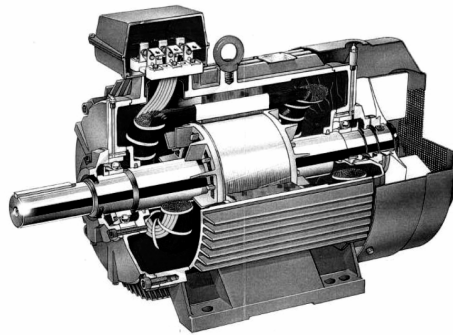
Työssä pyritään selvittämään, miten eri viat vaikuttavat moottorin sähkön ja lämmönsiirron suureisiin sekä miten nämä muutokset vaikuttavat moottorille koestuksissa saattaviin mittaustuloksiin. Tämä vaatii moottorin erilaisten vikojen listauksen sekä selvityksen, kuinka nämä vaikuttavat moottorin eri suureisiin. Lisäksi se vaatii moottorille tehtävien koestusten tarkastelun erityisesti siltä kannalta, mitä sähköisiä tai lämmönsiirron suureita eri koestuksissa mitataan.

Teoriaosuudessa pyritään käymään oikosulkumoottoreiden teoriaa tarpeeksi laajasti, jotta voidaan jatkossa hahmottaa, minkälaisia vikoja oikosulkumoottoreihin voi syntyä ja miten ne ilmenevät. Käsittelyosuudeltaan työ jakautuu kolmeen osaan:

1. moottorille tuotannossa mahdollisesti syntyvien vikojen sekä muiden mittaustuloksiin vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen,
2. vikojen selvittämisen kannalta oleellisten mittausten selvittämiseen ja
3. kahden edellisen kohdan yhdistämiseen siten, että jokaiselle tarkastavalle koekselle saadaan viat ja mittaustulokset yhdistävä vuokaavio.

## 2. OIKOSULKUMOOTTORI

Oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytettävä voimakone (Pyrhönen 1995: 183). Boldean & Nasarin (2001:1) mukaan teollisuusmaissa on yli 3 kW sähkömoottori-tehoa asukasta kohti, josta suurin osa muodostuu epätahtimoottoreista. Oikosulkumoottorin suosio perustuu suurelta osin sen yksinkertaiseen, kestäväan ja hinnaltaan edulliseen rakenteeseen. Kuvassa 1 on esitetty poikkileikkaus yksinapaparisesta 75 kW:n oikosulkumoottorista.



**Kuva 1.** ABB:n MB 280 -oikosulkumoottorin poikkileikkaus (Boldea ym. 2001: 3).

Oikosulkumoottoriin kuuluu sekä aktiivisesti että passiivisesti energianmuunnokseen osallistuvia osia. Aktiivisia osia ovat staattori ja roottori, passiivisia taas muun muassa runko ja laakerit.

Staattori koostuu uritetusta dynamolevyypaketista, urissa kulkevasta ja vyyhdenpäättävistä muodostavasta käämityksestä sekä eristemateriaaleista ja hartsista. Staattoripaketti valmistetaan laminoiduista, akselinsuuntaisesti yhteen ladotuista dynamolevykiekoista. Ladontasuunnan ansiosta ne vastustavat akselin suuntaisia virtoja ja täten heikentävät pyörrevirtoja mutta eivät häiritse suuremmin magneettivuon kulkua. Käämitys on yleensä useaan uraan jaettu kolmivaihekäämitys, joka on valmistettu polyamidi-imidi eristeellä pinnoitetusta kuparilangasta (Stone, Boulter, Culbert & Dhirani 2004: 107). Muita staattorissa olevia eristeitä ovat vaihevälieristeet, joita käytetään käämien päissä eristämään vaiheet toisistaan sekä uraeriste joka eristää käämityksen staattoripaketista.

Hartsin tehtävänä on lujittaa käämitystä mekaanisesti sekä parantaa lämmönjohtavuutta ja suojata epäpuhtauksilta (Pyrhönen 1995: 259).

Roottori koostuu roottoripaketista ja häkkikäämityksestä. Häkkikäämitys muodostuu roottoripaketin urissa olevista sauvoista sekä ne päädyissä yhdistävistä oikosulkurenkaista. Usein häkkikäämitys painevaletaan alumiinista suoraan roottoripaketin sisälle, jolloin sauvoja ei tarvitse erikseen kiinnittää oikosulkurenkaisiin, eikä sauvan ja rungon välissä käytetä eristeitä. Käämitys voidaan valmistaa myös kuparisauvoista tai häkkikäämityksen sijaan voidaan käyttää kokonaan massiivirautaista roottoria.

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu liikkuvan magneettikentän ja virrallisten johtimien väliseen vaikutukseen, joka synnyttää Lorénzin voiman ja sitä kautta vääntömomentin. Sähköenergiaa muunnetaan liike-energiaksi ja samalla osa käytetystä energiasta muuttuu lämmöksi.

## 2.1. Staattorikäämitys

Monivaiheinen staattorikäämitys synnyttää koneen ilmaväliin pyörivän magneettikentän. Roottorin häkkikäämitykseen ei syötetä erikseen virtaa, vaan staattorikäämitys osallistuu myös koneen magnetoinnin synnyttämiseen. Pyörivä magneettivuontiheys indusoi roottorisauvoihin jännitteen, joka oikosuljetussa häkkikäämityksessä synnyttää magnetoinnin tuottavan virran. Jännitteen indusoitumiseksi on magneettivuontiheyden leikatava roottorisauvoja, toisin sanoen roottorin on pyörittävä hitaammin kuin magneettikentän, eli epätahdissa.

Staattorin vaihekäämissä vaikuttava sähkökentänvoimakkuus  $E$  synnyttää ilmaväliin Faradayn lain mukaisen magneettivuontiheyden  $B$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} , \quad (1)$$

missä  $S$  on pinta-ala ja  $l$  pituus. Kun tarkastellaan indusoituvan jännitteen huippuarvoa sekä huomioidaan moottorin geometria ja käämin kierrosten määrä, voidaan kirjoittaa magneettivuon huippuarvon ja sähkömotorisen voiman huippuarvon välille

$$\hat{e} = 2\pi f N k_w \hat{\Phi}_m, \quad (2)$$

sekä magneettivuon ja magneettivuontiheyden välille

$$\hat{\Phi}_m = \frac{2}{\pi} \hat{b} \tau_p l', \quad (3)$$

missä  $N$  on käämikierrosten lukumäärä,  $k_w$  on käämityskerroin,  $\hat{\Phi}_m$  on päävuon huippuarvo,  $\tau_p$  on napajako ja  $l'$  on moottorin sähköinen pituus. (Pyrhönen 1995: 177.) Yhtälön mukaisesti magneettivuontiheys on kääntäen verrannollinen syötettävään taajuuteen ja suoraan verrannollinen indusoituvaan jännitteeseen.

## 2.2. Magneettiipiiri

Päävuon puolikas kulkee kahden ilmvälän, staattorihampaiden ja -selän sekä roottorihampaiden ja -selän kautta. Jokaisella näistä vuon läpäisemistä kappaleista on oma magneettijännitteensä, johon vaikuttaa kappaleen koko sekä siinä vaikuttava vuontiheys. Tämä magneettijännite vaatii tietyn määrän magnetomotorista voimaa  $\Theta$ , jonka synnyttämiseen tarvitaan magnetointivirtaa  $i$ . Yhtälöiden 2 ja 3 mukaisesti magneettiipiirissä vaikuttaa vuontiheys, joka on riippuvainen käytettävästä jännitteestä ja taajuudesta sekä lävistämänsä kappaleen leveydestä ja korkeudesta. Ampéren lain mukaan

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = i(t), \quad (4)$$

missä  $\mathbf{H}$  on magneettikentän voimakkuus ja  $\mathbf{J}$  on virrantiheys. Sähkömoottorissa tulee lisäksi huomioida, että käämi koostuu useista kierroksista  $N$  ja on jakautunut uriin. Lisäksi koko käämitys muodostuu useista navoista  $p$  ja vaiheista  $m$ . Käämin synnyttämälle magnetomotoriselle voimalle saadaan (Pyrhönen 1995: 43)

$$\Theta = \frac{mk_w N}{\pi p} i. \quad (5)$$

Kun sijoitetaan yhtälöön 4 virran tilalle magnetomotorinen voima ja yhdistetään yhtälöt 4 ja 5 saadaan magneettikentän voimakkuudelle ja magnetomotoriselle voimalle yhtälö

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Theta. \quad (6)$$

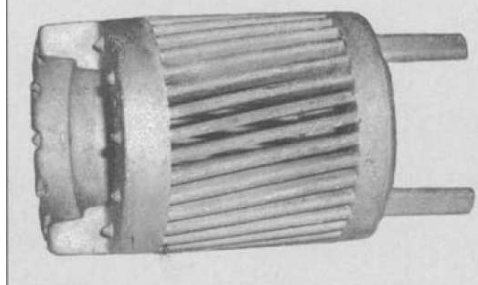
Yhtälön 5 mukaan magnetointivirta on riippuvainen magneettiipiirin vaatimasta magnetomotorisesta voimasta  $\Theta$ . Tämä magnetomotorinen voima saadaan yhtälön 6 avulla magneettiipiirin pituudesta  $l$  ja magneettikentän voimakkuudesta, joka taas on riippuvainen piirin vuontiheydestä ( $B = \mu H$ ). Näin ollen moottorin vaatima magnetointivirta on riippuvainen yhtälön 5 mukaisesti käämityksen kierrosten määrästä ja yhtälön 6 mukaisesti magneettiipiirin pituudesta ja siinä vaikuttavan magneettikentän voimakkuudesta

### 2.3. Roottorikäämitys

Staattorissa pyörivä virtakatteen huippuarvo synnyttää 90 sähköastetta jäljessä kulkevan magnetomotorisen voiman, joka synnyttää samassa vaihesiirrossa olevan magneettivuontiheyden (Pyrhönen 1995: 186). Kun roottori pyörii hitaammin kuin magneettivuo, indusoituu roottorisauvoihin jännite, jonka huippuarvo saavutetaan aina siinä sauvassa joka leikkaa vuontiheyden huippuarvoa. Kuvassa 2 on esitetty epätahtikoneen alumiininen häkkikäämitys, jossa on roottoriuravinoutta.

Roottorisauvoissa vaikuttaa siis vaihtovirta, jonka taajuus kasvaa suhteessa jättämään ja on suurimmillaan sama kuin moottoriin syötettävän virran taajuus. Tämä tapahtuu roottorin ollessa pysähdyksissä. Jännite on samassa vaiheessa magneettivuontiheyden kanssa, mutta virran vaihesiirto jännitteeseen riippuu häkkikäämityksen reaktanssista ja resistanssista. Koska reaktanssi on verrannollinen roottoriin vaikuttavaan taajuuteen, saa se suurimman arvonsa silloin, kun roottori on jumissa ja pienimmän arvonsa, lähes nol-

lan, kun moottori käy tyhjäkäynnillä. Virran vaihesiirtoon voidaan siis vaikuttaa muuttamalla roottorin reaktanssin ja resistanssin välistä suhdetta.



**Kuva 2.** Epätahtikoneen häkkikäimityksen rakenne, josta roottorilaminaatit on poistettu kemiallisesti korroosion avulla (Fitzgerald, Kingsley & Umans 2002: 308).

### 2.3.1. Vääntömomentti

Kun pyörivä magneettivuo leikkaa virrallisia,  $l$  pituisia roottorisauvoja, pyrkii Lorenzin voima työntämään sauvoissa liikkuvia varauksia

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}. \quad (7)$$

Vääntömomentti saadaan kun lisätään vielä roottorin säde, ja sijoitetaan virran sijaan virtakate sekä huomioidaan että vääntömomenttia syntyy koko roottorin pinnan matkalla,

$$\tau = 2\pi r A l B \cos(\zeta_r) r. \quad (8)$$

Kulma  $\zeta_r$  on roottorikäimityksen reaktanssin ja resistanssin välinen kulma, joka on riippuvainen jättämästä  $s$ , (Pyrhönen 1999: 188)

$$\cos(\zeta_r) = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + (s\omega L)^2}}. \quad (9)$$

Kulma kertoo virran vaihesiirron jännitteeseen nähden ja myös jännitteen kanssa samassa vaihesiirrossa olevaan vuontiheyden huippuarvoon nähden. Lorenzin voima saisi

suurimman arvonsa, kun virran huippuarvo on magneettivuon huippuarvon kohdalla. Tällöin  $\cos(\zeta_r)$  saa arvon yksi, eli roottorissa ei ole lainkaan reaktanssia. Tämä tapahtuu silloin, kun roottorivirran taajuus on nolla, eli kun moottori on tyhjäkäynnissä. Tällöin sauvoissa ei kuitenkaan kulje virtaa eikä vääntömomenttia synny. Roottorin ollessa ju-missa eli moottorin ollessa oikosulussa virta on taas suurimmillaan. Kuitenkin koska taajuus on suurimmillaan, on myös reaktanssi suurimmillaan, jolloin roottorin virtakateen huippuarvo on siirtynyt kaukaisimpaan asemaan vuontiheyden huippuarvosta. Roottorin vääntömomenttiin ja sen käyttäytymiseen eri jättämällä voidaan vaikuttaa valitsemalla roottorisauvojen muoto sopivasti.

### 2.3.2. Roottoriuoramuodot

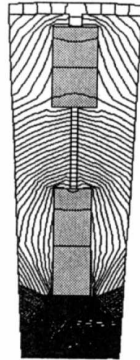
Roottorikämmityksen suunnittelu vaatii kompromisseja. Jotta saataisiin hyvä hyötysuhde, on resistanssin oltava mahdollisimman pieni. Toisaalta taas käynnistystilanteessa resistanssi olisi hyvä olla suuri, jotta käynnistysvirta ei kasva suureksi ja saadaan hyvä vääntömomentti. Normaalisti oikosulkumoottorin käynnistysvirta on noin 5–6-kertainen verrattuna nimellisvirtaan (Stone ym. 2004: 139).

Roottorisauvan resistanssiin moottorin eri jättämällä voidaan vaikuttaa uran muotoilulla. Kun ura tehdään roottorin säteen suuntaisesti korkeaksi ja ohueksi alkaa virranahto pakata virtaa sauvan yläosaan. Tämä johtuu siitä että sauvan alaosassa syntyvän vuon yhteys staattoriin ja täten päävuohon on heikompi kuin yläosassa, jolloin se jää helpommin hajavuoksi. Tämän seurauksena hajavuontiheys ja reaktanssi kasvavat sauvan alaosaan kohti mentäessä ja virta kulkee helpommin sauvan yläosassa. Virranahto on siis riippuvainen sauvan synnyttämästä vuosta ja sen vaikutus kasvaa kun roottorivirran taajuus kasvaa. Tästä johtuen virranahto on suurimmillaan käynnistystilanteissa ja katoaa kun jättämä lähestyy nollaa. (Pyrhönen 1999: 93–95.)

Yhden syvän uran sijaan voidaan käyttää myös kaksoishäkkiä, jolloin virta ahtautuu suurilla taajuuksilla ylempään häkkiin ja pienillä taajuuksilla kulkee myös alemmassa. Kuvassa 3 on esitetty kaksoishäkkikämmitys ja sen aiheuttama magneettivuo (Boldea ym. 2001: 286). Resistanssia voidaan siis pienentää kasvattamalla sauvan poikkipinta-

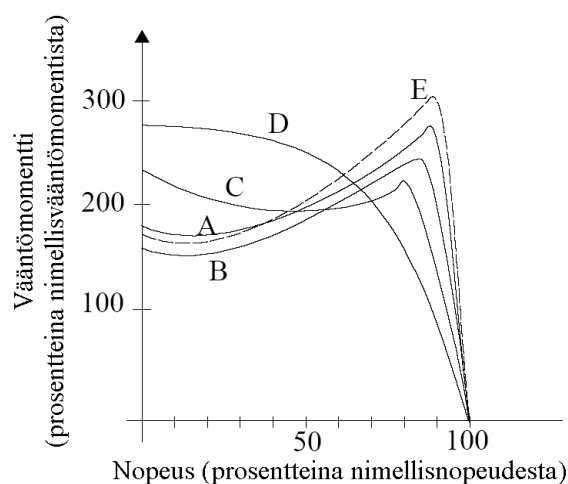


alaa ja reaktanssia kasvattaa siirtämällä sauvaa lähemmäs roottorin keskustaa eli leven-  
tämällä sauvan ja ilmapölyn väliin jäävää rautalevyn muodostamaa kannasta.

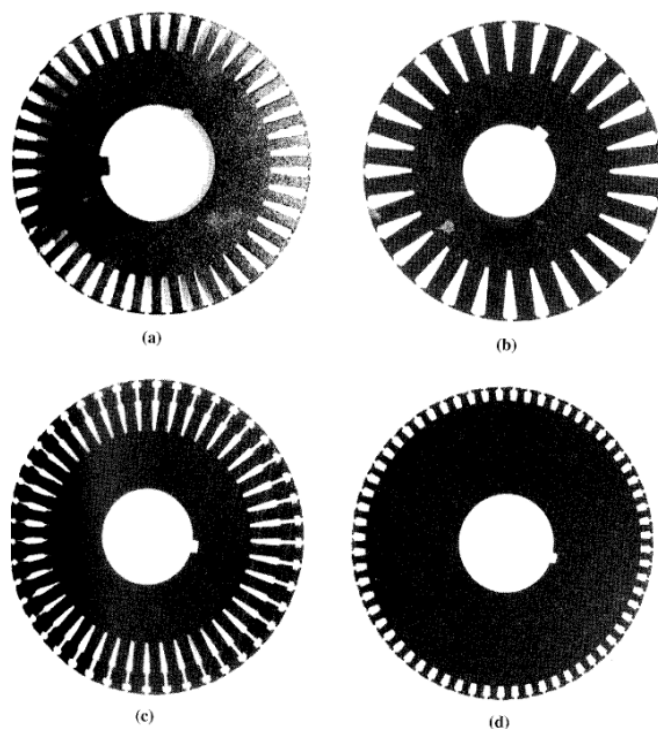


**Kuva 3.** Kaksoishäkkikäänitys ja sen aiheuttama magneettivuo (Boldea ym. 2001: 286).

Roottorisauvojen muotoilulla voidaan siis vaikuttaa roottorisauvojen resistanssiin eri jättämällä, toisin sanoen sillä voidaan vaikuttaa moottorin momenttikäyrän muotoon. National Electrical Manufacturers Association (NEMA) määrittelee oikosulkumoottoreille viisi erityyppistä roottoria. (Boldea ym. 2001: 287–288.) Näiden vääntömomenttikäyrät on esitetty kuvassa 4 ja NEMA tyyppille A-D tyypillisiä roottoriuramuotoja, kuvassa 5.



**Kuva 4.** Oikosulkumoottorin viiden erityyppisen roottorin vääntömomentin suhde jättämään (Boldea ym. 2001: 287).



**Kuva 5.** Tyypillisiä roottoriuramuotoja. NEMA luokan A roottorilevy (a), isot urat lähellä roottorin pintaa. NEMA luokan B roottorilevy isot ja syvät roottoriurat (b). NEMA luokan C roottorilevy, kaksoishäkkikäämitykselle (c). NEMA luokan D roottorilevy, pienet urat lähellä pintaa (d) (Chapman 2004: 192).

Tyyppin A roottorissa on melko suuret urat lähellä roottorin pintaa. Sauvojen suuresta pinta-alasta johtuen resistanssi on pieni. Sijainti lähellä pintaa taas aiheuttaa vähemmän hajavoita ja täten pienemmän reaktanssin. Sauvojen pieni resistanssi aiheuttaa hyvän hyötysuhteen mutta toisaalta heikon käynnistysvääntömomentin ja suuren käynnistysvirran. Tyypillisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi pumput ja tuulettimet. (Chapman 2004: 192.)

B-tyypin roottoreissa käytetään syviä uria, jotka käynnistystilanteissa, suuritaajuisella vuolla, synnyttävät reaktanssia sauvan alaosaan ja täten ahtavat virtaa uran yläosaan. Tästä johtuen sauvan poikkipinta-ala näyttää pienemmältä käynnistystilanteessa ja kasvaa jatkuvan tilan arvoaan kohti kun jättämä lähestyy nollaa. B-tyypin koneiden käyttö-

kohteet ovat suurelta osin samoja kuin A-tyyppin koneilla. Parempien käynnistysominaisuuksiensa ansiosta ne ovat kuitenkin useimmiten syrjäyttäneet nämä (Chapman 2004: 194).

C-tyyppin koneissa käytetään kaksoishäkkikäämitystä, eli lähellä pintaa käytetään pieni-poikkipinta-alaisia sauvoja, joissa resistanssi on suuri, mutta reaktanssi pieni. Sisemällä roottorissa taas käytetään suurempipoikkialaisia sauvoja, joissa ominaisuudet ovat päinvastaiset. Käynnistettäessä virta kulkee ylemmissä, suuriresistanssisissa sauvoissa ja jättämän pienentyessä yhä enemmän virtaa alkaa kulkea alemmissä, pieniresistanssisissa sauvoissa. Käytökseltään kaksoishäkkikäämitys on samantapainen kuin syväurakäämitys, mutta virranahdon aikaansaama resistanssin muutos on suurempi. Tyypillisiä käyttökohteita ovatkin suurta käynnistysvääntömomenttia vaativat kohteet, kuten kompressorit tai kuljettimet. (Chapman 2004: 194.)

D-tyyppin moottoreissa urat ovat hyvin pieniä, ja lähellä pintaa. Tämän johdosta käämityksellä on pieni reaktanssi ja suuri resistanssi. Hyötysuhde ja vääntömomentti jäävät pienillä jättämillä heikoksi, mutta käynnistysominaisuudet ovat hyvät ja huippuvääntömomentti saadaan jo hyvin suurilla jättämillä. Yleisiä käyttökohteita ovatkin erittäin suuren hitausmomentin kuormat. (Chapman 2004: 192.) Samanlaiset ominaisuudet saadaan myös jos dynamolevypaketin sijaan käytetään kokonaan rautaista roottoria (Boldea ym. 2001: 287–288).

E-tyyppin moottorit ovat korkean hyötysuhteen moottoreita. Niissä saadaan samalla pyörimisnopeudella ja teholla 1–4 % parempi hyötysuhde kuin B-tyyppin moottoreissa. Käynnistysvirta on kuitenkin yleensä suurempi. Lisäksi ne joudutaan rakentamaan suurempaan runkokokoon jolloin myös valmistus tulee kalliimmaksi. Moottoreiden pitkän, usein yli 10 vuoden, käyttöään johdosta ne tulevat eliniän aikaisilta kokonaiskustannuksiltaan kuitenkin edullisimmiksi. (Boldea ym. 2001: 287–288).

### 2.3.3. Tahti- ja epätahtivääntömomentit

Pieni muutos moottorin staattori- tai roottoriurien määrässä saattaa aiheuttaa sen, että moottorista tulee hyvin meluisa tai että se ei saavuta nimellispyörimisnopeuttaan. Nämä ovat tahti- ja epätahtivääntömomenttien vaikutuksia. (Heller & Hamata 1977: 102.)

Staattorikäämityksen jakautuminen erillisiin käämeihin aiheuttaa portaallisen magnetomotorisen voiman. Symmetrinen kolmivaihekäämitys synnyttää yliaaltoja  $v$ , jotka saadaan yhtälöstä

$$v = 1 \pm 6n, (n = 0, 1, 2, \dots) . \quad (10)$$

Yhtälön mukaisesti neljä ensimmäistä aaltoa ovat 5, 7, 11 ja 13 (Pyrhönen 1995: 79). Nämä yliaallot aiheutuvat siis käämityksen epätasaisesta jakautumisesta staattoriin.

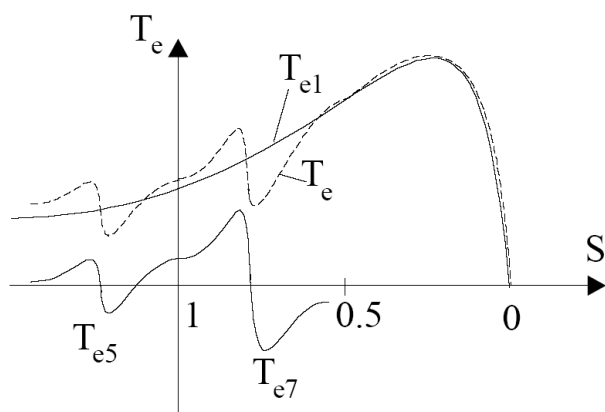
Toinen yliaaltojen aiheuttaja on urituksesta johtuva epätasainen permeanssi. Staattori- ja avonaisesta roottoriurituksesta johtuen rauta on jakautunut epätasaisesti dynamolevypaketin pinnalle. Tästä johtuen permeanssi ja vuontiheys laskevat aina uran kohdalla ja kasvavat hampaan kohdalla. Tämä synnyttää urayliaaltoja joiden järjestysluku riippuu staattorin tai roottorin uraluvuista  $Q$ ,

$$v = \frac{nQ}{p} \pm 1. \quad (11)$$

Permeanssin jakautumiseen ilmeväälissä vaikuttaa myös mahdollinen hampaiden kyllästyminen sekä roottorin staattinen ja dynaaminen epäkeskeisyys. (Heller ym. 1977: 54, 247.)

Jos ei huomioida perusaaltoa ja ajatellaan moottoria seitsemännen yliaallon kannalta, voidaan olettaa että se (7. yliaalto) indusoi käynnistystilanteessa roottorikäämitykseen jännitteen, joka saa aikaan virran. Virrallisten sauvojen leikatessa saman seitsemännen yliaallon magneettivuontiheyden, syntyy vääntömomentti. Roottori pyörii tämän vääntömomentin mukaisella tyhjäkäynnillä, pyörimisnopeudella joka on seitsemäsosa pääaallon vastaavasta. Seitsemäs yliaalto muodostaa oman vääntömomenttikäyränsä, joka

kasvattaa koneen kokonaisvääntömomenttia tyhjäkäyntinopeutensa alapuolella ja heikentää sitä tyhjäkäyntinopeutensa yläpuolella. Kun ensimmäisen ja seitsemännen yliaallon vääntömomenttikäyrät yhdistetään, saadaan kuvan 6 mukainen käyrä. (Pyrhönen 1995: 197–198.)



**Kuva 6.** Moottorin vääntömomentti suhteessa jättämään. Kuvassa on esitetty 5. ja 7. yliaalto, perusaalto sekä niiden summa-aalto (Boldea ym. 2001: 307).

Näitä yksittäisten yliaaltojen synnyttämiä vääntömomenteja sanotaan epätahtivääntömomenteiksi. Mitä korkeamman asteen yliaaltoa tarkastellaan, sitä suuremmille jättämille tämän yliaallon huippuvääntömomentti asettuu. Viidettä astetta korkeampien yliaaltojen synnyttämät epätahtivääntömomentit ovat kaikki hyvin lähellä jättämän arvoa yksi ja tästä syystä ne saattavat estää moottorin käynnistymisen (Boldea ym. 2001: 335)

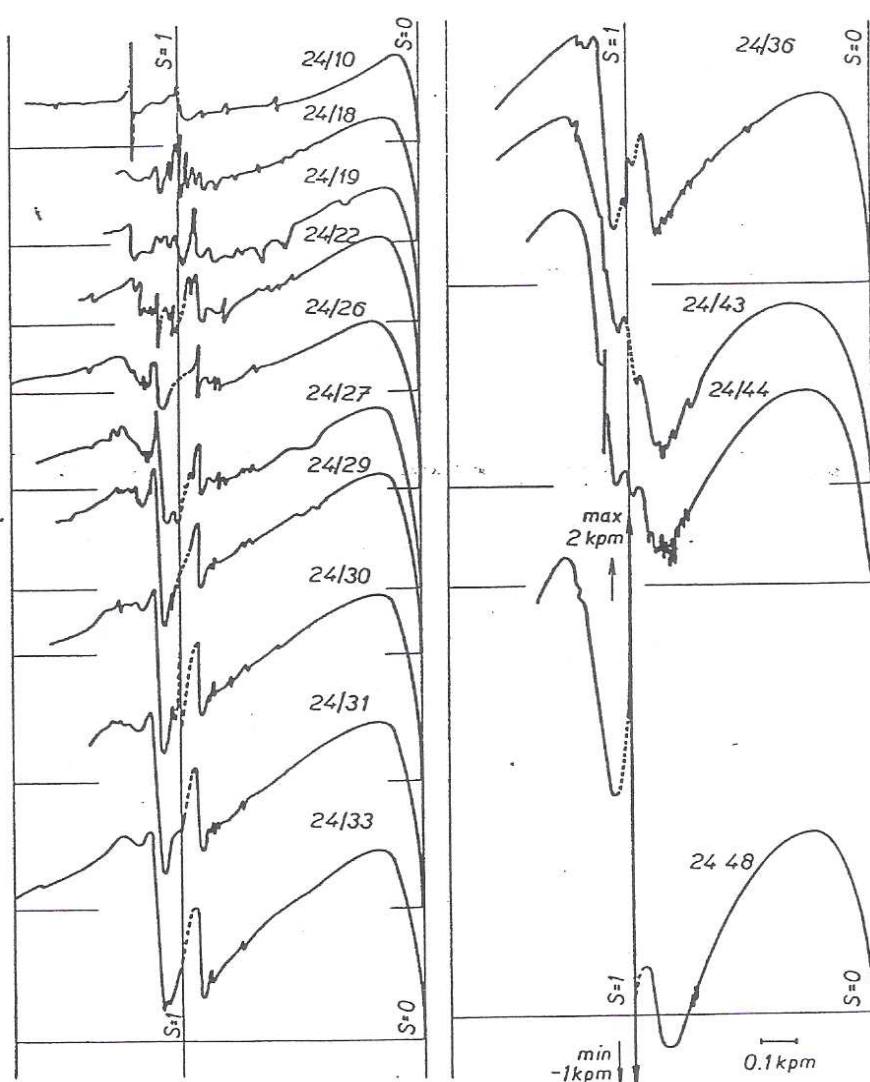
Staattorikäämityksen tavoin myös roottorin häkkikäämitys synnyttää yliaaltoja  $\mu$ , joiden järjestysluvut riippuvat roottorin uraluvusta  $Q_r$

$$\mu = vp \pm nQ_r, \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (12)$$

Sopivassa tapauksessa roottori- ja staattorikäämitys saattavat synnyttää yhtä moninapaisen yliaallon. Normaalisti nämä yliaallot kulkevat toistensa ohi ja aiheuttavat tärinää ja ääntä, mutta jollain tietyllä moottorin jättämällä näillä saattaa lisäksi olla sama pyörimisnopeus. Tällöin yliaallot pyrkivät tahdistamaan moottorin tälle jättämälle ja saavat aikaan vääntömomentin, jota sanotaan tahtivääntömomentiksi. Nämä tahtivääntömo-

mentit näkyvät moottorin vääntömomenttikäyrässä piikkeinä tietyillä jättämällä ja niiden ulkopuolella niiden vaikutus on vähäinen. (Pyrhönen 1995: 202–203; Boldea ym. 2001: 307–310.)

Kuten yhtälöistä 11 ja 12 voidaan todeta, roottorin ja staattorin uraluvut vaikuttavat moottorin synnyttämiin yliaaltoihin ja tätä kautta tahti- ja epätahtivääntömomenteihin. Kuvassa 7 on Möllerin (1930) mittaamia kaksinapaparisien, 24 uraisen, 1,1 kW oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyriä, neljällätoista eri roottoriuraluvulla.



**Kuva 7.** Kaksinapaparisien 1,1 kW oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyriä, eri roottoriuraluvuilla (Möller 1930).

Kuvasta voidaan tarkastella esimerkiksi uralukua 24/30 jossa näkyy epätahtivääntömomentti pyörimisnopeudella 115 kier/min ja tämän jälkeen tahtivääntömomenteja pyörimisnopeuksilla 200, 214, 300, 400 ja 600 kier/min. Induktiomoottori voidaankin ajatella mekaanisesti samalle akselille kytkettyinä useina eri napaparilukuisina tahti- ja epätahtikoneina, joiden synnyttämät tahti- ja epätahtivääntömomentit aiheuttavat moottorissa tärinöitä ja ääntä. Lisäksi ne hidastavat roottorin kiihdytystä nimellispyörimisnopeuteen, tai saattavat estää moottoria saavuttamasta nimelliskoepuutta estämällä käynnistymisen tai lukitsemalla roottorin pyörimään jollain tietyllä jättämällä. (Heller ym. 1977: 107, 159, 164.)

Yliaaltovääntömomenteja voidaan pienentää muun muassa pidentämällä ilmaväliä, kasvattamalla roottori-resistanssia, jänteistämällä käämitys sopivasti, tai asettamalla roottoriurat staattoriuriin nähden vinoon (Heller ym. 1977: 166–167; Pyrhönen 1995: 48, 203). Uraluvut on valittava tapauskohtaisesti siten, että yliaaltojen vaikutuksista on mahdollisimman vähän häiriöitä. Taulukossa 1 on listattu eri napapariluvuille sopivia uralukuja. Suluissa olevat uraluvut eivät sovi jarrutuskäyttöön tahtivääntömomenttien takia, hakasuluissa olevat uraluvut vaativat yhden staattoriuran mittaisen roottoriuravinoisuuden (Heller ym. 1977: 297).

**Taulukko 1.** Eri napapariluvuille sopivia uralukuja (Heller ym. 1977: 297).

$Q_s$	$Q_r$	$p$
24	(16), [20], ([22]), (28), [30]	1
30	(16), [20], (22), [26], [34], [36]	
36	[24], 26,[28], 30, ([32]), 42, (44), [46]	2
48	(32), 34, [36], 38, [40], ([44]), (56), 58, [60]	
36	24, [26], [46]	3
54	38, 40, [44], [64], 66, [68]	
48	34, [62]	4
72	50, 52, 54, [56], 58, 86, 88, [90]	

#### 2.4. Oikosulkumoottorin magneettinen ääni

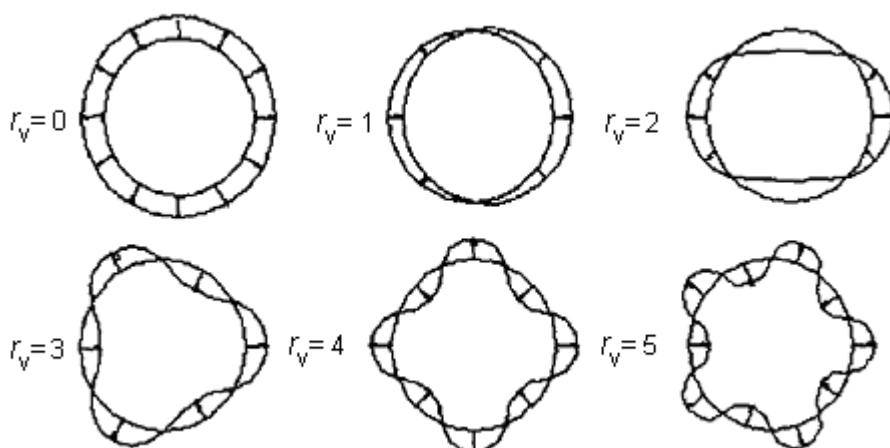
Epätahtikoneen äänilähteet voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan, jäähdytyksen tuottama ääni, laakereiden tuottama ääni ja magneettinen ääni. Nopeasti pyörivissä kaksi- tai nelinapaisissa moottoreissa merkittävin äänen tuottaja on jäähdytys, kun taas hitaammissa kuusi- tai useampinapaisissa moottoreissa magneettinen ääni on merkittävin. Tämä johdetaan napaluvun kasvaessa pienenevästä puhaltimen kehänopeudesta mutta myös kapenevasta roottorin selästä. Kapeampi roottoriselkä on herkempi täriseämään ilmapölyssä vaikuttavien magneettisten paine-aaltojen ansiosta. Laakereiden synnyttämä ääni ei yleensä ole merkittävä verrattuna kahteen muuhun äänilähteeseen. (Nau & Mello 2000: 253.) Luvun loppuosassa käsitellään ainoastaan magneettista ääntä.

Magneettinen värinä ja ääni syntyvät roottorin ja staattorin synnyttämien magneettivuon perus- ja yliaaltojen vaikutuksista. Aallot reagoivat toisiinsa synnyttäen magneettisia voima-aaltoja, jotka vaikuttavat säteensuuntaisesti roottori- ja staattoripaketteihin, aiheuttaen niissä muodonmuutoksia ja tätä kautta värinää ja ääntä (Gieras, Wang & Lai 2006: 5). Äänen voimakkuus riippuu voima-aaltojen voimakkuuksien lisäksi muun muassa rakenteiden jäykkyyksistä ja ominaistajuuksista sekä värähtelevien pintojen äänensäätelyominaisuuksista. (Jokinen 1980: 6; Gieras ym. 2006: 107.) Moottorin roottori voidaan ajatella kiinteäksi, melko massiiviseksi sylinteriksi ja staattoripaketti taas ontoksi ohutpintaiseksi sylinteriksi, jonka sisäpintaan voima-aallot vaikuttavat. Tästä syystä yleensä oletetaan, että roottoripaketin muoto ei muutu merkittävästi, vaan magneettinen ääni syntyy pääasiassa staattoripaketin muodonmuutoksista (Heller ym. 1977: 188).

Värähtelykuvio  $r_v$  kuvaa sitä, kuinka magneettinen paineaalto pyrkii vääntämään staattoripakettia. Kuviot yhdestä viiteen on esitetty kuvassa 8. Värähtelykuvio on tietylle värinää tuottavalle aaltoparille kuuluva ominaisuus ja syntyy aaltojen napaparien kombinaationa (Nau & Mello 2000: 253). Sykkivä tai ”hengittävä” värähtelykuvio,  $r_v = 0$  jakautuu tasaisesti staattorin alueelle. Se synnyttää staattorille säteensuuntaista värinää, samantapaisesti kuin sylinteri jonka sisällä on muuttuva ylipaine. Akselia taivuttava värähtelykuvio  $r_v = 1$  synnyttää staattorin ja roottorin välille yksisuuntaisen magneettisen voiman, joka pyrkii vääntämään akselia vinoon. Tämänäyttöinen värähtelykuvio syntyy interferenssistä kahden vuontiheysaallon välillä, kun niiden napaluku poikkeaa yhdellä.



Värähtelykuvio  $r_v = 2$  pyrkii vääntämään staattorin ovaalin ja  $r_v = 3-5$  kyseessä olevan paineaallon muotoiseksi. Värähtelykuvion tai voima-aallon napaluvun kasvaessa voiman vipuvarsi lyhenee ja värähtely heikkenee. (Heller ym. 1977: 191–192.) Äänen tuoton kannalta kuviot kahteentoista asti ovat merkittäviä, näistä tärkeimpiä ovat kuviot 0–4. Joissain tapauksissa, erityisesti suurikokoisilla koneilla, kuviot voivat olla merkittäviä 20:een asti. (Nau & Mello 2000: 256; Gieras ym. 2006: 49.)



**Kuva 8.** Värähtelykuvioita, eli staattoripakettiin vaikuttavia voima-aaltoja (Nau & Mello 2000: 253).

Kuten aiemmin todettiin magneettiset paineaallot syntyvät yli- ja perusaaltojen vaikutuksesta toistensa kanssa. Paineaallot taas ovat tietyn taajuisia ja niillä on tietty värähtelymuoto. Paineaaltojen määrään ja voimakkuuteen vaikuttaa yliaaltojen määrä, joita taas synnyttävät epäjatkuva käämitys ja epätasainen ilmavälin permeanssi, joka johtuu uraukoista, levypakettien kyllästymisestä ja roottorin epäkeskeisyydestä. Näiden lisäksi yliaaltoja aiheuttaa taajuusmuuttajakäytössä koneeseen syötettävä epäsinimuotoinen virta. (Jokinen 1980: 20.)

Taulukkoon 2 on kerätty induktiomoottoriin vaikuttavat magneettiset paineaallot sekä niiden taajuudet ja värähtelykuviot. Yhtälöissä  $s_1$  on staattoriuraluku,  $s_2$  roottoriuraluku,  $f$  jännitteen taajuus,  $f_r$  tärinän taajuus ja  $f_\mu$  on roottori aallon taajuus ja  $\mu$  on roottorin ja staattorin synnyttämän aallon luku. Taulukossa esitettyjen tärinänlähteiden lisäksi epä-

symmetrinen syöttöjännite synnyttää tärinöitä perustaaajuutta kaksinkertaista suuremmalla taajuudella (Gieras ym. 2006: 58).

**Taulukko 2.** Induktiomoottoriin vaikuttavat magneettiset paineaallot sekä niiden taajuudet ja värähtelykuviot (Gieras ym. 2006: 59).

Yliaaltojen Aiheuttaja	Taajuus (Hz)	Värähtelykuvio
Staattorin synnyttämät samanapariset yliaallot	$f_r = 2f$	$r_v = 2vp$ $r_v = 2(ks_1 \pm p)$ ( $k = 0,1,2,3,\dots$ )
Roottorin synnyttämät samanapariset yliaallot	$f_r = 2f[1 \pm k(s_2/p)(1-s)]$	$r_v = 2\mu p$ $r_v = 2(ks_2 \pm p)$
Roottorin ja staattorin synnyttämät yliaallot	$f_r = f \pm f_\mu$	$r_v = (v \pm \mu)p$
Roottorin ja staattorin synnyttämät uritusyliaallot	$f_r = [k(s_2/p)(1-s) \pm 2]f$ $f_r = [k(s_2/p)(1-s)]f$	$r_v = ks_1 \pm ks_2 \pm 2p$
Staattorin ja roottorin staattisen epäkeskeytyden synnyttämät yliaallot	$f_r = [2 + k(s_2/p)(1-s)]f$ $f_r = [k(s_2/p)(1-s)]f$	$r_v = 1$ $r_v = 2$
Staattorin ja roottorin dynaamisen epäkeskeytyden synnyttämät yliaallot	$f_r = [2 \pm (1-s)/p + k(s_2/p)(1-s)]f$ $f_r = [(1-s)/p + k(s_2/p)(1-s)]f$	$r_v = 1$ $r_v = 2$
Staattorin ja roottorin magneettisen kyllästymisen synnyttämät yliaallot	$f_r = [k(s_2/p)(1-s) + 4]f$ $f_r = [k(s_2/p)(1-s) + 2]f$	$r_v = ks_1 + ks_2 + 4p$ $r_v = ks_1 + ks_2 + 2p$

Kaksinapaisissa koneissa tärinä, jonka taajuus on kaksi kertaa virran syöttötaajuus, ei välttämättä kuitenkaan kerro viasta, vaan niissä syntyy luonnostaan huomattavasti tärinää kyseisellä taajuudella. Taulukossa 2 esitetty staattorin synnyttämien samannaparisien yliaaltojen synnyttämä tärinä ( $f_r = 2f$ ) onkin merkittävä tekijä kaksinapaisissa koneissa, mutta ei tätä suuremmilla napaluvuilla. Tämä johtuu siitä, että perusaallon värähtelykuvio on taulukossa 2 esiintyvän yhtälön ( $r_v = 2vp$ ) mukaisesti yksinapariselle

moottorille kaksi ja esimerkiksi kaksinapapariselle moottorille neljä. Koska roottorin vääntymä  $\Delta d$  riippuu värähtelykuvioista, yhtälön

$$\Delta d \propto \frac{1}{r_v^4} \quad (28)$$

mukaisesti, suppenee vääntymä 1/16-osaiseksi, kun napapariluku kasvaa kahdesta neljään ja samalla tärinän amplitudi vaimenee (Gieras 2006: 49).

## 2.5. Häviöt

IEC 60034-2-1 (2007: 9–12) standardi määrittelee oikosulkumoottorin häviöt kolmeen eri luokkaan. Nämä ovat kuormasta riippumattomat häviöt, kuormasta riippuvat häviöt ja lisähäviöt.

Kuormasta riippumattomat häviöt sisältävät jäähdytys- ja kitkahäviöt, jotka ovat pääasiassa verrannollisia moottorin pyörimisnopeuteen sekä rautahäviöt, jotka ovat riippuvaisia vuontiheydestä ja taajuudesta (Pyrhönen 1995: 123, 125). Kuormasta riippuviin häviöihin kuuluu staattori- ja roottoripiirin kuparihäviöt ja lisähäviöihin häviöt, jotka syntyvät epäsinimuotoisesta jännitteestä (Boldea ym. 2001: 374) sekä käämityksen ja urituksen synnyttämistä yliaalloista (Heller ym. 1977: 247).

### 2.5.1. Rautahäviöt

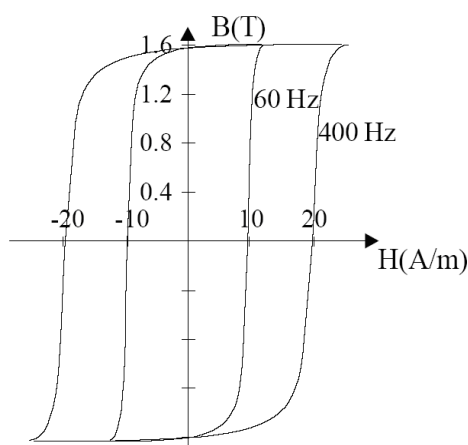
Rautahäviöt syntyvät dynamolevyissä vaikuttavan, muuttuvan magneettivuontiheyden toimesta. Häviöt jaetaan, aiheuttavan ilmiön mukaan pyörrevirta- ja hystereesihäviöiksi.

Pyörrevirtahäviöt,  $P_p$  syntyvät kun dynamolevyä pitkin etenevä magneettivuo indusoi ympärilleen vuontiheyden ja -taajuuden mukaisen jännitteen. Häviö on riippuvainen virran reitin resistanssista sekä vuon lävistämisen alueen tilavuudesta  $V$ . Virran reitin resistanssi saadaan materiaalin resistiivisyydestä  $\rho$  ja piirin pituudesta, joka johtuen levyn ohuudesta, on likimain kaksi kertaa dynamolevyn osan, esimerkiksi hampaan leveys  $d$  (Pyrhönen 1995: 123–125)

$$P_p = \frac{E^2}{R} = \frac{V\pi^2 f^2 d^2 \hat{B}_m^2}{6\rho}. \quad (13)$$

Pyörrevirtahäviöitä voidaan vähentää sekoittamalla rautaan piitä, joka lisää raudan resistiivisyyttä ja myös kovuutta. Tämä kuitenkin heikentää raudan magneettisia ominaisuuksia sekä kasvattaa kustannuksia. Toinen tapa pyörrevirtahäviöiden pienentämiseen on käyttää ohuempia dynamolevyjä. Tällöin samankokoisen paketin raudan määrä pienenee, lisäksi ohuempi rautalevy on kalliimpaa valmistaa sekä koota paketiksi. (Beckley 2002: 69.)

Hystereesihäviöt syntyvät Weissin alueiden muutoksista magneettisessa materiaalissa (Boldea ym. 2001: 38). Vuontiheyden vaihdellessa nolasta noin kahteen teslaan rauta kykenee voimistamaan magneettikenttää huomattavasti ilmaa tehokkaammin ja mahdollistaa siten sekä energian että tilan säästön (Beckley 2002: 12). Tälle vuontiheysalueelle muodostuu kuvan 9 mukainen hystereesisilmukka, jota kierretään rautaan vaikuttavan vuontiheyden taajuudella.



**Kuva 9.** Hystereesisilmukan koko 60 Hz ja 400 Hz taajuudella (Boldea 2001: 38).

Silmukan pinta-alan  $S_{Hy}$ , tarkasteltavan kappaleen tilavuuden  $V$  ja vuontiheyden taajuuden avulla saadaan hystereesihäviöt

$$P_{Hy} = fVS_{Hy}. \quad (14)$$

Hystereesihäviöiden määrittämiseen käytetään usein empiiristä yhtälöä, jossa hystereesisilmukan alaa arvioidaan vuontiheyden maksimiarvolla sekä kokeellisilla vakioilla  $k_h$  ja  $n$ , yhtälön 15 mukaisesti (Pyrhönen 2005: 123.)

$$P_{Hy} = fV k_h B_{Max}^n \quad (15)$$

Molemmat häviöt ovat yhtälöiden 12 ja 13 mukaisesti suoraan verrannollisia taajuuteen. Tästä syystä rautahäviöillä ei ole suurta merkitystä roottorissa, jossa magneettivuon taajuus on nimellisjättämällä hyvin pieni.

### 2.5.2. Kuparihäviöt

Kuparihäviöt ovat koneen staattori- ja roottorikäädämyksessä tapahtuvia virtalämpöhäviöitä, jotka ovat suoraan verrannollisia johtimessa kulkevan virran neliöön ja kääntäen verrannollisia resistanssiin

$$P_{Co} = \frac{I^2}{R} \quad (16)$$

Käädämyksen resistanssiin vaikuttaa käädämin pituus  $l$ , käytettävän materiaalin johtavuus  $\sigma$  sekä rinnakkaisten johtimien määrä  $a$  ja johdinpinta-ala  $S$

$$R = \frac{l}{a\sigma S} \quad (17)$$

Resistanssi on riippuvainen lisäksi johtimen lämpötilasta sekä virranhahtautumisesta, jolla kuitenkin on merkittävää vaikutusta vasta suurilla johtimen halkaisijoilla. Muotokuparikäädämyksissä staattorikäädämyksissä virranahdo kasvattaa resistanssia ja heikentää hyötysuhdetta. Syväuraisissa roottorikäädämyksissä taas virranahdosta on etua käynnistilanteessa. (Pyrhönen 1995: 149–150.)

### 2.5.3. Lisähäviöt

Yliaaltojen vaellus roottorin ja staattorin ohi aiheuttaa lisähäviöitä. Ne synnyttävät rautahäviöitä staattorin ja roottorin pinnassa sekä aiheuttavat kokonaisvuon värähtelystä

johtuvia rautahäviöitä roottori- ja staattorihampaissa. Näiden lisäksi roottorikäänymyksessä syntyy häviöitä yliaaltojen synnyttämistä roottorivirroista.

Lisäksi joissain tapauksissa yliaaltoja saattaa aiheuttaa roottorin eristämätön häkkikäänitys jossa käytetään uravinoutta. Näissä saattaa ilmetä virtoja, jotka eivät kierrä oikosulkurenkaisiin asti, vaan oikaisevat sauvasta toiseen rautalaminaattien kautta. (Heller ym. 1977: 219–245, 257.)

## 2.6. Lämmönsiirto

Moottorin käänityksen lämpötilan tunteminen on hyödyllistä, koska eristeiden eliniän määrää suurelta osin niiden lämpötila. Käänityksen lämpötilaan vaikuttaa lämmön siirtyminen rungosta ympäristöön ja lämpötilan jakautuminen koneen sisällä.

Lämpö siirtyy ympäristöön johtumalla rungon mahdollisista jaloista ja laipasta sekä akselista, säteilemällä rungon pinnasta sekä pakotetulla tai vapaalla konvektiolla ympäröivään ilmaan. Koneen sisällä lämmön siirtymiseen vaikuttaa pääasiassa johtimien uraristeen ja staattoripaketin väliset lämpötilavastukset sekä staattoripaketin ja rungon välinen lämpötilavastus. Johtumisen lisäksi lämpöä siirtyy konvektiolla ja säteilemällä vyyhdenpäissä ja ilmapälissä. Lämmönsiirtymisen tehokkuuteen vaikuttaa yleensä pääasiassa rungon pinnalla pakotettu konvektio ja moottorin sisällä liitoskohtien lämpöresistanssit. (Pyrhönen 1995: 272–278.)

### 2.6.1. Johtuminen

Lämmönsiirtymisen tarkastelua voidaan yksinkertaistaa kun se ajatellaan yksiulotteisena, lämpövirran  $Q_{th}$  kulkuna lämpöresistanssien  $R_{th}$  läpi,

$$Q_{th} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}. \quad (18)$$

Kappaleen lämpöresistanssi riippuu pituudesta lämmön johtumissuunnassa  $l$ , kappaleen pinta-alasta  $S$  ja lämmönjohtavuudesta  $\lambda$

$$R_{\text{th}} = \frac{l}{\lambda S}. \quad (19)$$

Kappaleiden lämpöresistanssien lisäksi tulee huomioida liitoskohtien lämpöresistanssit, jotka lasketaan kokeellisesti yhtälön 18 avulla, kun tiedetään lämpötilaero ja lämpövirta. Liitoksen lämpötilaresistanssiin vaikuttavat kappaleiden väliin jäävän aineen ominaisuudet, pintojen karkeudet ja ominaisuudet sekä liitoksen lämpötila ja liitokseen vaikuttava paine. (Cengel 2003: 68, 129–139.)

### 2.6.2. Pakotettu konvektio

Lämmön siirtäminen konvektiolla on johtumista monimutkaisempi tapahtuma, koska se pitää sisällään lämmön johtumisen jäähdytysaineeseen ja lisäksi jäähdytysaineen liikkeen. Konvektion tehokkuus riippuu pääosin jäähdyttävän pinnan muodosta ja karkeudesta sekä jäähdytysaineen liikkeestä ja ominaisuuksista. Jäähdytysaineen liikkeeseen vaikuttaa aineen, esimerkiksi ilman, nopeus ja pyörteisyys. Ominaisuuksiin vaikuttavat jäähdytysaineen dynaaminen viskositeetti, lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti ja tiheys. (Cengel 2003: 334–335.)

Luonnollinen konvektio on lämmönsiirroltaan samaa luokkaa kuin säteily, mutta käytämällä pakotettua konvektiota lämmönsiirto saadaan 5–6-kertaiseksi (Pyrhönen 1995: 276). Konvektion yhtälö on melko yksinkertainen, mutta siinä esiintyvä lämmönsiirtokertoimen  $h$  arvo on riippuvainen useista edellä mainituista tekijöistä ja onkin monimutkainen laskea

$$\dot{Q}_{\text{th}} = hA_s(T_s - T_\infty). \quad (20)$$

Boldea, ym. (2001: 362) antaa ilmajäähdytteen moottorin lämmönsiirtokertoimen arvioimiseen yhtälön

$$h = h_0(1 + k\sqrt{v}), \quad (21)$$

Missä  $v$  on jäähdytysaineen nopeus. Kerroin  $k$  saa arvon 0,5 kun tarkastellaan rungon pintaa, 1 kun tarkastellaan kääninpäitä ja 0,8 kun tarkastellaan roottorin pintaa. Kerroin

$h_0$  on luonnollisen konvektion lämmönsiirtokerroin joka riippuu moottorin asennusasennosta

$$h_0 \approx k_0 (\Delta T)^{0,25}, \quad (22)$$

siten että  $k_0$  on horisontaalisesti asennetulle koneelle 0,67, akselinpää ylöspäin asennetulle 2,158 ja akselinpää alaspäin asennetulle 0,496.  $\Delta T$  on jäädytysaineen ja jäähdytettävän pinnan välinen lämpötilaero. Pyrhönen (1995: 276) antaa lämmönsiirtokertoimen arvioimiseen hieman edellisestä poikkeavan yhtälön

$$h \approx 3,86 \sqrt{\frac{v}{l}}. \quad (23)$$

### 2.6.3. Oikosulkumoottorin lämpenemä

Käytännössä moottorin lämmönsiirto on melko monimutkaista, johtuen lämmön useista kulkureiteistä, vaikeasti mitattavista lämpöresistansseista ja moottorin komponenttien, erityisesti kääminpäiden, monimutkaisesta geometriasta. Apuna voidaan käyttää lämpöpiirin sijaiskytkentää, mutta monimutkaisemmat ongelmat kannattaa ratkaista esimerkiksi elementtimenetelmällä (Pyrhönen 1995: 278).

Moottorin komponenttien lämpötila riippuu moottorissa syntyvistä häviöistä, lämpöresistansseista ja kääminpäissä ja rungon pinnalla konvektiosta. Yhtälössä 18 esiintyvä lämpöresistanssi riippuu komponenttien lämmönjohtavuudesta ja mitoista sekä komponenttien välisten liitosten ominaisuuksista. Yhtälö 20 kuvaa lämmön siirtymistä rungon pinnasta ja kääminpäistä ympäristöön ja on riippuvainen jäähdytettävän pinnan pinta-alasta ja lämmönsiirtokertoimesta  $h$ , joka on verrannollinen jäähdytysaineen nopeuden neliöjuureen.

Moottorin lämpötilan ylärajana toimivat yleensä eristyksen asettamat lämpötilarajat. Käämityksen korkeimmat käyttölämpötilat suhteessa eristyksen lämpötilaluokkaan on esitetty taulukossa 3.



**Taulukko 3.** Sähkökoneiden eristysluokat (Suomalaiset ABB-yhtiöt 2000: 457).

Määritelmät	Eristysluokka		
	B	F	H
Sallittu kuumimman pisteen lämpötila	130 °C	155 °C	180 °C
Sallittu vastusmittauksen avulla määritetty käämityksen lämpötila	120 °C	145 °C	165 °C
Sallittu käämityksen lämpenemä kun ympäristön korkein lyhytaikainen lämpötila on +40 °C	80 °C	105 °C	125 °C

Käytännössä tiedetään että eristyksen elinikä pienenee huomattavan nopeasti, jos nämä rajat ylitetään. Moottorin rakenteesta riippuen elinikä likimain puolittuu aina kun käämityksen lämpötila kasvaa 10 °C. Moottoria suunniteltaessa onkin tärkeää asettaa eristyksen korkein lämpötila yhdeksi suunnittelua rajoittavista tekijöistä. Lämmön poistaminen moottorista ja lämpötilan jakautuminen moottorin sisällä sekä moottorin kuumimman pisteen löytäminen ovat eristyksen ja moottorin käyttöiän kannalta erityisen tärkeää. Useimmissa moottoreissa kuumin piste sijaitsee staattorikäänin päissä. (Boldea 2004 12: 326.)

### 3. OIKOSULKUMOOTTORIN KOESTUKSET

Luvussa käydään läpi moottorille kokoonpanossa tehtävät rutiinikoestukset ja lisäksi lämpenemäkoee sekä värinäspektrimittaus, joilla on mahdollista löytää vikoja, joita rutiinikoee ei välttämättä paljasta. Rutiinikokeilla tarkoitetaan sellaisia mittauksia, joilla jokainen yksittäinen moottori testataan ja joilla varmistetaan että moottori täyttää sille annetut laadulliset vaatimukset. Koneille saatetaan tehdä valmistuksessa muitakin mittauksia, esimerkiksi tyyppikokeet, joilla varmistetaan että joku tietty konetyyppi läpäisee sille asetetut vaatimukset (IEC 2004: 13). Tyyppikokeisiin kuuluu yleensä rutiinikoestuksessakin käytettävien mittausten lisäksi muita kokeita, esimerkiksi juuri edellä mainittu lämpenemäkoee.

Rutiinikoestukseen kuuluvia kokeita on mainittu IEC ja NEMA standardeissa. IEC standardissa 60034-1 (2004: 52) listataan epätahtikoneille tehtävän rutiinikoestuksen vaatimukset. Standardin mukainen rutiinikoestus vaatii vähintään vaihevastusmittauksen, eristyskokeen ja pyörimissuunnan tarkastuksen sekä tyhjäkäyntivirran ja -tehon mittaukset. NEMA MG 1 (2006: 265–266, 456) standardi luettelee monivaiheiselle epätahtimoottorille tyypillisesti tehtävät koestukset. NEMA:n suositukset poikkeavat IEC:n vaatimista siten, että tyhjäkäyntitehon sijaan mitataan pyörimisnopeus moottorin käydessä tyhjäkäynnillä. Taulukossa 4 on listattu edellä mainittujen standardien mukaiset rutiinikoestukset sekä kuinka ne eroavat toisistaan.

Taulukossa 4 listattujen koestusten lisäksi IEEE (2000: 3) suosittelee eristysvastuskoetta tehtäväksi, muun muassa ennen eristyskoetta (High Potential test). Tällöin voidaan havaita märät tai likaiset staattorit ja kuivattaa tai puhdistaa ne, jolloin välttyään mahdolliselta eristyskokeen aiheuttamalta eristeaurioltalta (Stone ym. 2004: 238). Lisäksi useat moottorivalmistajat tekevät rutiinikoestuksessaan myös toistoaltokokeen, joka on nopea ja edullinen tapa käämityksen eristeiden ja symmetrisyyden testaamiseen (NEMA 2006: 243). Kuten luvun alkuosasta voidaan havaita, rutiinikoestusten sisältö riippuu jonkin verran niiden soveltajasta. Jatkossa rutiinikoestuksilla tarkoitetaan sisällysluettelossakin listattuja: vaiheiden vastusmittausta, eristysvastuskoetta, eristyskoetta, toisto-

aaltokoetta, tyhjäkäyntikoetta ja oikosulkukoetta, siitä syystä että nämä sisältyvät ABB Motorsin rutiinikoestukseen.

**Taulukko 4.** NEMA standardin (2006: 265–266) mukaan moottorille tyypillisesti tehtävät ja IEC standardin (2004: 52) mukaan moottorilta vähintään vaadittavat rutiinimittaukset.

	Koestus	IEC	NEMA
1	Käämityksen vaiheiden resistanssit	x	x
2	Häviöt ilman kuormaa	x	
3	Virrat ilman kuormaa	x	x
4	Pyörimisnopeus ilman kuormaa		x
5	Virrat, kun roottori on lukittu paikalleen		x
6	Pyörimissuunta	x	
7	Eristyskoe	x	x

### 3.1. Vaiheiden vastusmittaus

Vastusmittaus suoritetaan tasavirtaresistanssimittauksena jokaiselle vaiheelle. Resistanssiin vaikuttavat kuparijohtimen pituus ja halkaisija sekä johtimia yhdistävät holkki-liitokset.

Vastusmittaus suoritetaan yleensä useaan otteeseen sekä valmiiksi kootuille että keskenäisille moottoreille. Mittauksessa saatuja arvoja voidaan verrata käämitykselle lasketuihin arvoihin sekä poikkeamaan vaiheiden välillä.

### 3.2. Eristysvastuskoe

Eristysvastus mitataan rungon ja jokaisen vaiheen väliltä noin 500–1000 voltin tasajännitteellä. Ehjälle eristeelle mitatun resistanssin tulisi olla yli gigaohmin (Stone ym. 2000: 241). Vastusarvo on suoraan verrannollinen eristeiden paksuuteen ja kääntäen verrannollinen eristettävän johtimen pinta-alaan. (IEEE 2000: 4.)

Eristevastusmittaus paljastaa lisäksi eristyksen likaantumisen tai kosteuden. Kokeessa saadut vastusarvot riippuvatkin suuresti ilmankosteudesta, joka noustessaan alentaa resistanssiarvoja ja saattaa tästä syystä aiheuttaa sen, ettei ehjä eristys läpäise testiä. (Stone ym. 2000: 241–242.) Tästä johtuen ilmankosteutta kannattaa aika-ajoin mitata eristysvastuskokeen suorituspaikalla. Eristysvastus mitataan yksi vaihe kerrallaan siten, että muut vaiheet ovat maadoitettuina. Tällöin saadaan resistanssi mitattua sekä maaeristeeltä että vaihevälieristeeltä.

### 3.3. Eristyskoe

Eristyskokeessa vaiheiden ja rungon yli johdetaan tasajännite, joka on huomattavasti koneen nimellisjännitettä suurempi (Stone ym. 2000: 241). IEC (2004: 54) antaa koetusjännitteelle arvoksi

$$U_{test} = 2U_n + 1000V, \quad (24)$$

missä  $U_n$  on nimellisjännite.

Koe suoritetaan vaihe kerrallaan ja muut vaiheet maadoitetaan täksi ajaksi runkoon (IEC 2004: 53), koe siis testaa maaeristeen lisäksi myös vaihevälieristeet. Kokeessa ei siis mitata mitään arvoa vaan rungon ja vaiheen yli nostetaan jännite, jonka ehjän eristeen tulisi kestää, mutta joka vaurioittaa väärin asennettua, viallista, märkää tai likaista eristettä. Eristeen pettäessä rungosta eristeiden läpi johtimeen kulkee virtapiikki. Ehjän eristeen kohdalla siis koe ei reagoi mitenkään, mutta viallisen eristyksen kohdalla vaurioittaa eristystä ja laukaisee tehonlähteen suojauksen (Stone ym. 2000: 243–244). Kuten edelläkin mainittiin, eristysvastuskoe on hyvä tehdä ennen eristyskoetta, jottei viimeksi mainittu vahingoittaisi ehjää, mutta likaista tai märkää eristystä. Oikosulkumootorin eristeiden läpilyöntijännitteen kestämisokykyyn vaikuttaa pääasiassa eristeiden paksuus ja permittiivisyys (Pyrhönen 1995: 257, 258, 264).

### 3.4. Toistoaaltoke

Toistoaaltoke on edellä mainitun erityskokeen tapainen jänniteke kierroseristykselle. Käämityksen läpi ohjataan terävä virtapiikki, jonka ansiosta käämityksen yli oleva jännite ei ole lineaarisesti jakaantunut, vaan kierrosten välillä on potentiaaliero. Liian ohuen tai viallisen kierroseristeen kohdalla eriste pettää ja aiheuttaa kierrossulun. (Stone ym. 2000: 157–158)

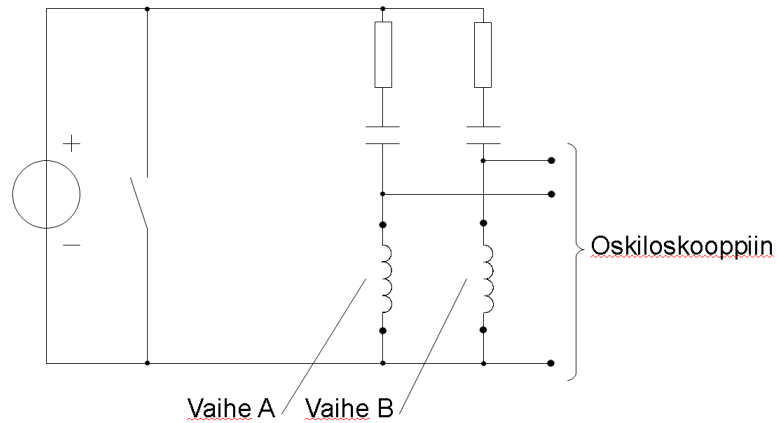
Edellä esitellyssä eristekokeessa määristyksen pettäminen aiheuttaa resistanssin arvon romahtamisen hyvin pieneksi, ja virran nopean kasvun, joka on helppo havaita. Kierroseristyksen pettäminen ei kuitenkaan vaikuta suuresti käämityksen kokonaisresistanssiin, varsinkaan jos kierroksia on useita. Toistoaaltokeessa kierrossulut havaitaan kuitenkin käämityksen kanssa sarjaan asetetun varatun kondensaattorin avulla. Tällöin varattu energia värähtelee käämityksen induktanssin ja kondensaattorin kapasitanssin välillä taajuudella

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (25)$$

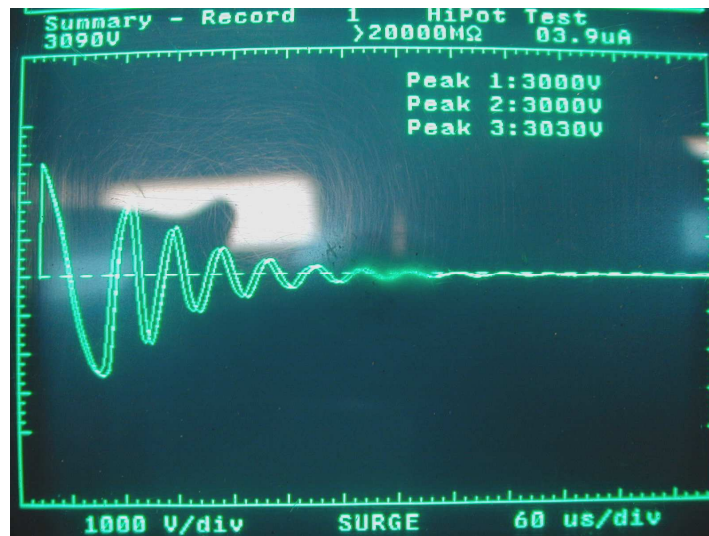
Kun tämä tehdään samaan aikaan kahdella kondensaattorilla, kahdelle eri vaiheelle niin värähtelyn aallonmuotoja voidaan verrata ja kierrossulun aiheuttama induktanssin ja resonanssitaajuuden muutos voidaan havaita oskilloskoopilla, vertaamalla kahden eri vaiheen käyriä. (Stone ym. 2000: 157–158, 265–268.) Toistoaaltoke mittaa siis staattorikäämityksen induktanssi eroja eri vaiheiden välillä. Kierroseristeen lisäksi toistoaaltoke paljastaa maasulun, vaihesulun ja väärät kytkennät sekä epäsymmetrisen kierros määrän vaiheiden välillä (NEMA 2006: 243). Kuvassa 10 on esitetty toistoaltokeestuksen kytkentäkaavio, jossa kolmivaiheisen moottorin vaiheita A ja B verrataan toisiinsa. Kuvassa 12 on toistoaltokeeseen tulos käämitykselle, jossa on kierrossulku. Yhden vaiheen värähtelytaajuus on hieman siirtynyt poikkeavan induktanssin johdosta.

Toistoaaltoke on tässä käsiteltävistä rutiinikokeista viimeinen, joka mittaa staattorieristyksen kuntoa. Tämän jälkeen tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeita tehtäessä voidaan olettaa, että eristys on ehjä. Tosin on mahdollista että itse koestus vaurioittaa eristeitä. Esi-

merkiksi jos urassa olevat johtimet on asennettu siten että ne ”pursuavat” ilmapölyä puolelleen on mahdollista että roottorin asennus ei vielä vaurioita uraeristettä, mutta tyhjäkäyntikokeesta johtuva roottorin pyöriminen hioo eristeen pois ja aiheuttaa maasulun.



**Kuva 10.** Toistoaltokokeuksen kytkentäkaavio kolmivaiheisen moottorin kahdelle vaiheelle, A ja B (Stone ym. 2000: 266).



**Kuva 11.** Toistoaltokokeen tulos virheelliselle käämitykselle.

### 3.5. Tyhjäkäyntikoe

Tyhjäkäyntikokeessa konetta ajetaan nimellisjännitteellä ja -taajuudella ilman että siitä siirretään tehoa ulos (IEC 2004: 9). Tyhjäkäynnissä staattori siis pyörittää roottoria ilman kuormaa, jolloin roottori pyörii lähes tahdissa ja häkkikäämitykseen ei indusoidu juurikaan jännitteitä. Koska roottorivirrat ovat hyvin pieniä on moottorin vaatima virta verrannollinen staattorikäämityksen resistanssiin ja induktanssiin, eli rautahäviöihin sekä magnetointi- ja hajavoihin.

Käytännössä moottorissa syntyy kuitenkin kitka- ja tuuletushäviöitä, jotka vaativat pienen jättämän ja roottorivirran. Kokeen kestolla saattaakin olla huomattava merkitys moottorin ottamaan tehoon, siten että lämpötilan noustessa voiteluaineen viskositeetti muuttuu, rasva tasaantuu ja ylimääräinen rasva poistuu, jolloin kitkahäviöt pienenevät. Kokeessa mitataan moottorin ottamaa virtaa ja tehoa, joita verrataan vaiheiden väliseen eroon sekä moottorille laskettuihin arvoihin.

### 3.6. Oikosulkukoe

Oikosulku- eli jumikokeessa, koneen roottori on lukittu paikoilleen ja koneeseen syötetään nimellistaajuus ja -jännite (IEC 2004: 9), tai nimellistaajuus ja alennettu jännite (NEMA 2006: 266). Läpäistyn tyhjäkäyntikokeen jälkeen voidaan olettaa että rautapiiri ja käämitys ovat kunnossa ja ilmavälit oikeanmittaiset, joten oikosulkuvirta on verrannollinen pääasiassa häkkikäämitykseen induktanssiin ja resistanssiin. Toisin sanoen oikosulkuvirta kuvaa häkkikäämityksen alumiinin määrää ja muotoa sekä asemaa roottorin sisällä. Kuten tyhjäkäyntikokeessakin, oikosulkuvirtaa verrataan laskettuihin tuloksiin sekä eroon vaiheiden välillä.

Ilmavälissä vuo on kuitenkin jakautunut epätasaisesti johtuen muun muassa siitä että molemmat käämitykset on jaettu uriin. Tästä syystä osaan sauvoista indusoituu keskimääräistä suurempi jännite ja osaan pienempi, jolloin viallinen sauva voi jäädä huomaamatta. Epäsymmetrian havaitsemiseksi roottorin asentoa voidaan kuitenkin muuttaa kokeen aikana (IEC 2004: 9).

### 3.7. Tärinäspektrimittaus

Tärinäspektrimittaukset suoritetaan molempien laakereiden läheisyydessä, aksiaali-, pysty- ja vaakasuuntaisesti. Sivulla 26 esitetyn taulukon 2 mukaisesti moottorin tärinät ovat useissa tapauksissa riippuvaisia kuormasta, johtuen jättämän vaikutuksesta tärinöiden synnyssä. Saadusta tärinäspektristä voidaan havaita sekä mekaanisia että sähköisiä vikoja. Nämä voidaan erottaa toisistaan katkaisemalla koneeseen syötettävä virta, jolloin sähköiset tärinät vaimenevat välittömästi, kun taas mekaaniset tärinät vaimenevat hitaasti, pyörimisnopeuden laskiessa. (IEEE 2006: 24.)

Tärinäspektristä havaittavia mekaanisia vikoja ovat esimerkiksi roottoriepätasapaino, vääntynyt akseli tai laakeriviat. Sähköisiä vikoja ovat epäsymmetrinen ilmaväli, huonot kytkennät, aukinaiset tai oikosuljetut käämit tai roottorikäämityksen epäsymmetrisyys. Sähköiset viat ilmenevät tärinäspektrissä usein moottorin pyörimistaajuudella, kaksinkertaisella pyörimistaajuudella tai erityisesti kaksinkertaisella syöttötaajuudella 2f. (IEEE 2006: 24–25.)

### 3.8. Lämpenemäko

NEMA (2006: 64) standardin määritelmän mukaan lämpenemäkoessa selvitetään moottorin tiettyjen komponenttien lämpötilojen nousu suhteessa ympäristön lämpötilaan, kun konetta kuormitetaan jollain tietyllä kuormituksella. IEC (2004: 38) antaa koneen osien lämpötilan mittaukseen kolme eri menetelmää: mittaus moottorin sisään rakennetuilla lämpötilamittareilla, mittaus ulkoisilla lämpötilamittareilla tai resistanssimenetelmä.

Lämpötilan mittausta varten koneeseen kokoonpanovaiheessa ja kääminnässä asennetut anturit voivat olla esimerkiksi vastuslämpötila-antureita, termopareja tai NTC-antureita. Anturit pyritään asentamaan mahdollisimman lähelle koneen oletettuja kuumia pisteitä: staattoriuriin ja kääminpäihin sekä laakereiden läheisyyteen. (IEC 2004: 41, 42.)



Lämpötila voidaan mitata myös valmiin koneen pinnoilta termopareilla, vastuslämpötila-antureilla tai nestepohjaisilla lämpötilamittareilla. Mittaus tehdään koneen pinnoilta, joissa lämpötila on todennäköisesti korkein. Esimerkiksi läheltä staattoripaketin päätyjä, joiden kautta kääminpäiden lämpö siirtyy runkoon. (IEC 2004: 42.)

Resistanssimenetelmässä käämityksen lämpötila määritetään käämityksen resistanssin muutoksen avulla. Resistanssi ja lämpötila ovat suhteessa toisiinsa

$$\frac{T_2 + k}{T_1 + k} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (29)$$

missä  $T_1$  ja  $T_2$  ovat käämityksen lämpötilat ennen koetta ja sen jälkeen,  $R_1$  ja  $R_2$  resistanssit ennen ja jälkeen, ja  $k$  on johtimen materiaalin resistanssin lämpötilakerroin. Mitauksia ajatellen yhtälö voidaan muuttaa käytännöllisempään muotoon

$$T_2 - T_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k_r + T_1) + T_1 - T_a, \quad (30)$$

missä  $T_a$  on ympäristön lämpötila. Resistanssin lämpötilakerroin  $k_r$  on kuparille 235 ja alumiinille 225. (IEC 2004: 38, 40.)

Lämpenemäkokeessa käytettävä aika riippuu koneen käyttötavasta. Jatkuvaan käyttöön tarkoitetuille koneille koe jatkuu siihen asti, että saavutetaan tasapainotila. Jaksolliselle käytölle aikaa voidaan lyhentää, kyseistä käyttöä paremmin kuvaavaksi. (IEC 2004: 42.)

#### 4. OIKOSULKUMOOTTOREIDEN KOMPONENTTIEN VIKAANTUMINEN

Tilastollista tietoa moottoreiden vikaantumisesta on kerännyt esimerkiksi O'Donnell (1985). Jossa on selvitetty kyselyn avulla teollisuudessa käytettyihin moottoreihin syntyneitä vikoja. Taulukossa 5 on esitetty roottorin ja staattorin eri komponenttien vikaantumisen todennäköisyydet. Staattorin ja roottorin viat käsittävät yhteensä 47 % kaikista vioista, loput koostuvat laakerivioista (41 %) sekä muista näihin ryhmiin kuulumattomista vioista (12 %) (O'Donnell, 1985: 863). Yli neljännes kaikista vioista näyttää johtuvan staattorieristeistä, tosin eristeiden pettäminen saattaa olla myös vian seuraus eikä alkuperäinen syy.

**Taulukko 5.** Induktiomoottoreiden staattorin ja roottorin viat (O'Donnell, 1985: 863).

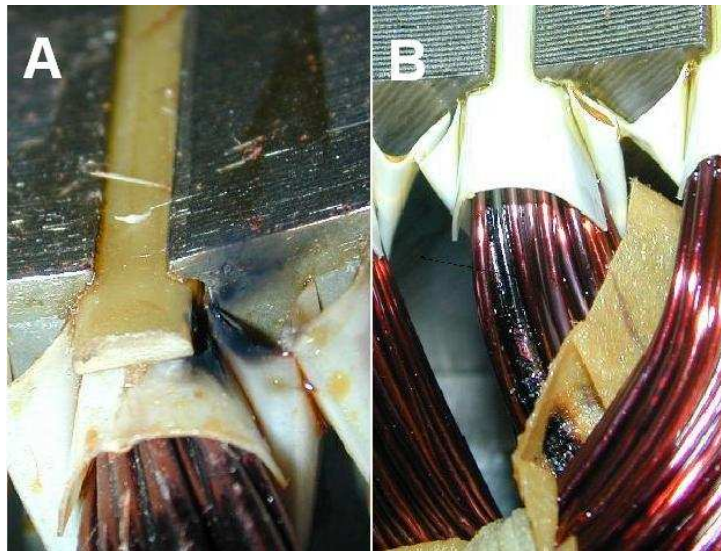
<b>Staattori</b>		
	Maaeriste	23 %
	Kierroseriste	4 %
	Tukirakenteet	3 %
	Urakiila	1 %
	Staattorirunko	1 %
	Muut	4 %
	<b>Yhteensä</b>	<b>37 %</b>
<b>Roottori</b>		
	Häkki	5 %
	Sauva	2 %
	Roottorirunko	1 %
	Muut	2 %
	<b>Yhteensä</b>	<b>10 %</b>

Taulukossa 5 esitettyjä vikaantumistietoja voidaan kuitenkin pitää enintään suuntaa-antavina, koska valmistuksen aikana moottoreihin syntyvät viat ovat erityyppisiä. Esimerkiksi osien kulumisella on huomattavasti suurempi merkitys käytössä syntyvissä vioissa. Tuotannossa taas syntyy vikoja jotka liittyvät kyseiseen tuotantoprosessiin,

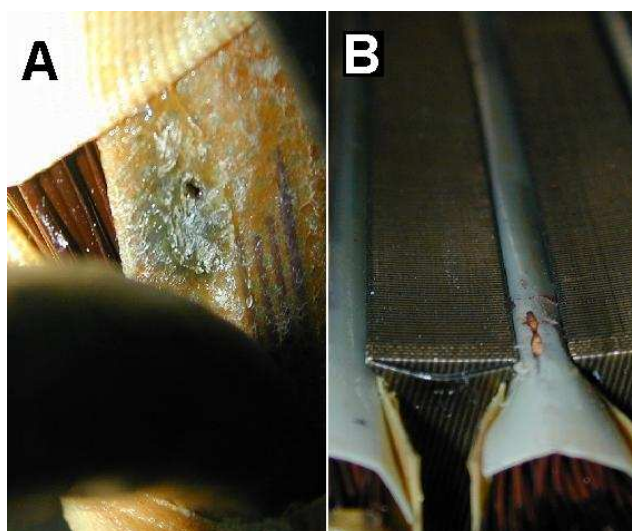
esimerkiksi väärään kohtaan puristettu staattori tai roottorin asennuksessa vaurioituneet eristeet. Toki tämä vaatii sen, että kokoonpanossa tehtävät viat havaitaan myös ennen moottorien toimitusta asiakkaalle, jotteivät ne jälkeinpäin päätyisi esimerkiksi yllä olevan kaltaiseen tilastoon.

#### 4.1. Eristeet

Eristeiltä vaadittavia sähköisiä ominaisuuksia ovat pieni sähkönjohtokyky, jolloin häviöt pysyvät pieninä ja riittävä jännitekestoisuus, jotta ei pääse syntymään läpilyöntejä (Pyrhönen 1995: 258). Eristeiden vaatimukset voidaan tarkistaa eristyskokeella, eristysvastuskokeella ja toistoaltokokeella. Kuvassa 12 on esitetty maaeristeen pettämisestä johtunut maasulku ja johtimien emalin pettämisestä johtunut kierrossulku. Kuvassa 13 taas näkyy läpilyönnistä vaurioitunut vaihe-eriste sekä virheellisestä käämityksen ja eristeiden asennuksesta johtuva roottorin osuminen eristeisiin ja johtimiin tästä aiheutunut maasulku.



**Kuva 12.** Eristykselle aiheutuneita vaurioita. Staattoriuran päässä syntynyt maasulku (a), kierrossulun tummentamat johtimet (b).



**Kuva 13.** Eristykselle aiheutuneita vaurioita. m vaihesulun synnyttämä reikä vaihe-eristeessä (a), roottori hangannut väärin asennettuun käämitykseen, joka on aiheuttanut eristeiden vaurioitumisen ja maasulun (b).

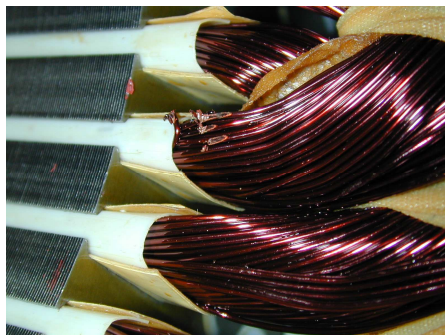
Oikosulkumoottorin eristeisiin kuuluvat johdineriste, maaeriste, liitäntäjohtimien eristeet sekä vaihe-eriste, lisäksi myös hartsi sekä urakiilat. Kuparikäämityksen eristeiden lisäksi staattori Levyt on eristetty toisistaan pyörrevirtojen estämiseksi, mutta niitä käsitellään alempana magneettivuon ja rautapiirin vikojen yhteydessä. Erityisesti johdinten ohuet emalieristykset ovat herkkiä rikkoutumaan esimerkiksi kolhuista.

#### 4.2. Kuparikäämitys

Staattorikäämitys on valmistettu staattoriuriin jaetusta kuparilangasta, josta voidaan mitata induktanssi ja resistanssi. Induktanssi ei kuitenkaan ole riippuvainen itse kuparin ominaisuuksista, vaan kuparilankaa ympäröivän aineen, toisin sanoen päävuon kulureitistä raudassa ja ilmvälissä sekä hajavoista. Kuparikäämitys koostuu yhteen- ja rinnankytketyistä kuparilankavyyhdeistä sekä niitä yhdistävistä liitännöistä. Resistanssiin vaikuttavat siis näiden vyyhtien kuparilangan pituus ja halkaisija sekä vyyhtejä yhdistävät liitännät.

Moottorin kokoonpanossa käämitykseen ja sen resistanssiin vaikuttaa siis onko moottoriin asennettu oikea staattorikäänitys, ovatko johdinten väliset liitokset onnistuneet ja ovatko johtimet ehjiä. Kuparikäämityksen resistanssi mitataan tasavirtaresistanssimittauksella, jossa saatuja tuloksia verrataan käämitykselle laskettuihin arvoihin.

Kuvassa 14 näkyy käämitykselle kokoonpanossa syntynyt vika, roottorin asennuksen yhteydessä vaurioituneita johdineristyyksiä ja katkenneita johtimia.



**Kuva 14.** Vaurioituneita eristeitä ja katkenneita johtimia.

#### 4.3. Magneettivuon rautapiiri

Koneen magneettivuon rautapiiri muodostuu roottori- ja staattoripaketeista, jotka taas muodostuvat toisistaan eristetyistä rautalevyistä. Näiden ominaisuuksilla on merkitystä pääasiassa staattorissa, johtuen siihen käytönaikana vaikuttavasta suuremmasta vuontajuudesta.

Tyhjäkäyntivirran induktiivinen osuus koostuu staattorin hajavuosta sekä erityisesti magnetointi-induktanssista, joihin rautapiirin muoto ja permeanssi vaikuttavat. Resisttiiviseen osuuteen vaikuttavat roottoriresistanssi ja erityisesti rautahäviöt.

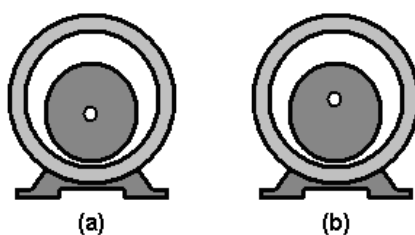
Käytännössä, jos on käytetty oikeaa staattoripakettia, permeanssiin voitaisiin vaikuttaa kidesuunnalla tai rautaseoksen permeabiliteetilla tai mahdollisesti raudan täyttekertoimella. Rautahäviöihin taas vaikuttavat levyjen resistiivisyys, levyjen paksuus ja levyjen välisten eristeiden kunto. Levyjen väliset eristeet ovat oikosulussa selänpuolelta run-

koon ja avonaiset hampaiden puolelta, jos hampaidenpuoleinen eristys vaurioituu alkavat pyörrevirrat kulkea levyjen kautta aksiaaliseen suuntaan ja rautahäviöt lisääntyvät.

#### 4.4. Ilmaväli

Ilmavälille merkittäviä tekijöitä on oikea muoto ja leveys sekä pituus, jotka määräävät ilmavälin permeanssin. Kuten rautalevyjenkin tapauksessa permeanssin, eli ilmavälin pituuden, muutos voidaan havaita tyhjäkäyntikokeessa. Pituuteen vaikuttavat roottorin ja staattorin aksiaalis-suuntainen kohdakkaisuus sekä roottorin ja staattorin mitat, eli roottorin ulkohalkaisijan sorvaus ja staattorin sisähalkaisijan leikkaus. Ilmavälin symmetriaan, mutta ei paljoa ilmavälin kokonaispituuteen, vaikuttaa roottorin staattinen tai dynaaminen epäkeskisyys.

Staattisen epäkeskisyyden tapauksessa ilmavälin pituus on riippuvainen tarkastelukohdasta staattorin sisäpinnalla. Dynaamisesti epäkeskisessä ilmavälissä pituus riippuu lisäksi roottorin kulmasta. Dynaaminen ja staattinen epäkeskisyys on selvitetty kuvassa 15.

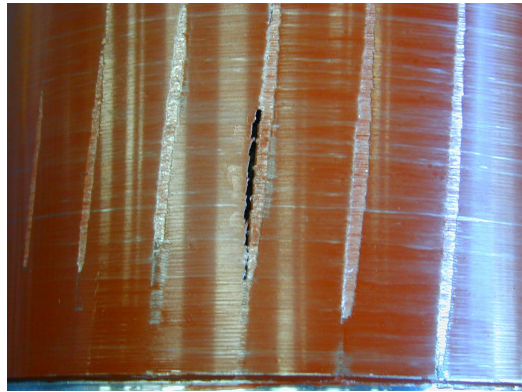


**Kuva 15.** Moottori, jonka ilmaväli on epäsymmetrinen staattisesti (a) ja dynaamisesti (b) epäkeskisen roottorin takia.

Kuten edellä mainittiin staattinen ja dynaaminen epäkeskisyys eivät muuta juurikaan ilmavälin kokonaispituutta ja täten ne eivät vaikuta ilmavälin permeanssiin. Tästä syystä staattinen- tai dynaaminen epäkeskisyys eivät juuri näy tyhjäkäyntivirrassa. Epäkeskisyys synnyttää kuitenkin mekaanista ja sähköistä tärinää ja jotka voidaan täten havaita tärinäspektristä.

#### 4.5. Roottorin häkkikäämitys

Roottorin häkkikäämitys koostuu oikosulkurenkaiden sekä sauvojen välikäytävien vikaantumisen kannalta merkittävä tekijä on roottorin impedanssi, joka voidaan tarkistaa oikosulkukokeella. Impedanssiin vaikuttavat uran oikea poikkipinta-ala, uran muoto, uran yläpuolisen kannaksen oikea koko ja urien oikea määrä lisäksi oikosulkurenkaiden oikea muoto ja pinta-ala sekä alumiinin täytekerroin. Alumiinin täytekerrointa saattaavat heikentää esimerkiksi seassa olevat kaasukuplat. Kuvassa 16 on esitetty viallinen roottorikäämitys, jossa yksi sauvojen välillä on epämuodostunut.



**Kuva 16.** Virheellinen roottorikäämitys.

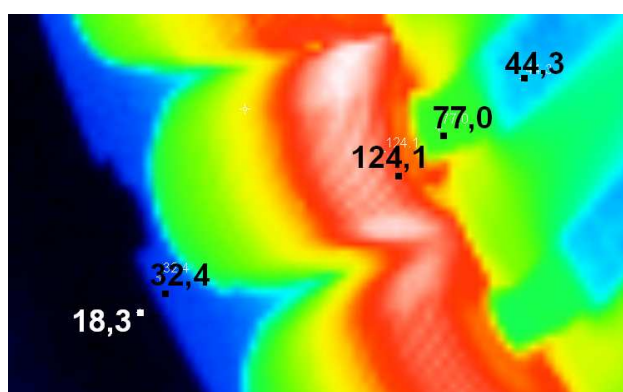
Urien muotoon vaikuttaa leikkauksen lisäksi levyjen asento toisiinsa nähden, mihin vaikuttaa valittu urakulma. Virheellinen urakulma vaikuttaa jonkin verran indusoituvaan jännitteeseen sekä sauvan impedanssiin. Häkkikäämityksen uravinoudella on edellä mainitun lisäksi toinenkin vaikutus; se heikentää tehokkaasti yliaaltojen vaikutuksia. Liian pieni uralukuvius saattaa näkyä koneen voimistuneena meluna ja tärinä. Sauvan resistanssia saattaa kasvattaa myös yksittäiset väärässä asennossa olevat roottorilevyt.

#### 4.6. Lämmönsiirto

Moottorin lämmönsiirrolla tarkoitetaan häviöinä syntyvän lämmön siirtämistä moottorista ympäristöön, jotta moottorin ja erityisesti käämityksen ja eristeiden lämpötilat saa-

taisiin pysymään riittävän matalana. Tätä seurataan mittaamalla moottorin kuuminta pistettä, joka sijaitsee useimmissa moottoreissa kääminpäissä. Moottorin lämmönsiirtoon vaikuttavat pääasiassa konvektio ja johtuminen.

Johtumalla siirtyvään lämpöön vaikuttavat lämmönlähteen eli komponenttien joissa häviöt syntyvät ja lämmön nielun eli ympäristön väliset lämpöresistanssit, joita muodostavat moottorin komponentit sekä erityisesti niiden väliset liitokset. Tätä on havainnollistettu kuvassa 17, jossa on lämpökamerakuva vesijäähdytteisen koneen staattorista ja rungosta. lämpötilat eivät kuvaa täysin todellista tilannetta, koska koneesta puuttuu muun muassa roottori ja kilpi, mutta siitä voidaan havaita kuinka lämpötila jakautuu ja jäähtyy kuljettaessa runkoa kohti. Kuvassa näkyvät moottorin osat ovat: kääminpää (124,1 °C), staattorihammas (77 °C), urakiila (44,3 °C), staattoriselkä (32,4 °C) ja koneen runko (18,3 °C).



**Kuva 17.** Lämpökamerakuva vesijäähdytteisen koneen staattorista ja rungosta. Hampaanpinnan matala 44,3 °C lämpötila johtuu luultavasti osaksi materiaalin heijastavasta pinnasta.

Kuvan mukaan lämpötila laskee 47,1 °C käämityksen ja staattorin välisellä rajapinnalla ja 14,1 °C staattorin ja rungonvälisellä rajapinnalla, mutta huomattavaa on myös, että staattoriraudassa, hampaan ja selän välinen lämpötilaero on 44,6 °C. Käytännössä kappaleetkin sisältävät merkittävästi lämpöresistanssia, joka riippuu pituudesta lämmön johtumissuunnassa, kappaleen pinta-alasta ja lämmönjohtavuudesta. Nämä eivät kuitenkaan ole helposti vikaantuvia tekijöitä. Liitoskohdat ovat juuri sen takia merkittäviä, että niissä voidaan tehdä lämmönjohtamisen heikentymiseen johtavia virheitä.



Lämmönsiirron kannalta tärkeimmät liitokset ovat staattoripaketin ja rungon välillä sekä käämityksen ja staattoripaketin välillä (Pyrhönen 1995: 275). Staattorin ja rungon välinen liitos tehdään teräsrunkoisissa koneissa puristamalla ja hitsaamalla ja valurautarunkoisissa koneissa puristamalla. Johdinten ja rungon välinen rajapinta koostuu uraeristeistä sekä kääminnän jälkeen lisättävästä hartsista.

Konvektiolla siirtyvään lämpöön vaikuttaa jäähdyttävän aineen nopeus ja lämpötila sekä jäähdytysaineen esteetön kulku moottorin sisä- ja ulkopinnoilla. Moottorin puhaltimien pyörimisnopeus on yleensä sidottu moottorin pyörimisnopeuteen mutta jäähdytysilman nopeuteen vaikuttaa tuulettimen koko ja muoto. Jäähdytysaineen esteettömään kulkuun vaikuttaa pääasiassa pintojen oikea muoto ja puhtaus.

#### 4.7. Yhteenveto

Taulukkoon 6 on listattu luvun aikaisemman osan perusteella moottorin eri komponenteissa esiintyvät viat ja ne mittaukset, joissa ne näkyvät. Lämmönsiirtoa ei listattu siitä syystä, että siinä ilmeneviä vikoja ei voida suoraan yhdistää mihinkään yksittäiseen komponenttiin, vaan sitä täytyy tarkastella kaikkien lämmönjohtumisreitillä olevien komponenttien kannalta.

Virheellisiä mittaustuloksia näyttää syntyvän kolmella eri tavalla. Ensimmäisessä käytetään ehjiä, mutta kyseiselle moottorille vääriä komponentteja, esimerkiksi toiselle moottorille tarkoitettua staattori- tai roottorikäämitystä. Toisessa on kyseessä käytettyjen osien käsittelyssä tapahtuneet vaurioitumiset tai virheelliset valmistusmenetelmät, esimerkiksi kuvien 11–13 eristeet. Kolmannessa on kyseessä mittauksessa käytettävän laitteiston aiheuttamat muutokset, esimerkiksi liitäntäadapterien kulumisesta aiheutuva ylimääräinen resistanssi.

Luvussa mainittujen komponenttien lisäksi moottorissa on muitakin mahdollisesti vikaantuvia osia, kuten lämmitysvastukset ja lämpötila-anturit. Lisäksi moottorissa on mekaanisia komponentteja, jotka voivat vikaantua, kuten laakerit tai voitelujärjestelmä.

**Taulukko 6.** Moottorin eri komponenteissa esiintyvät viat.

	Vikaantunut osa	Mittaus
Eristeet	Vaihe-eriste Maaeriste Kierroseriste	Eristekoe, eristysvastuskoe, toistoaaltoke
Staattori- käämitys	Katkennut johdin Väärä käämitys Korkearesistanssiset liitokset	Resistanssimittaus
Rautapiiri	Staattorilevyjen oikosulku Väärä levyn resistanssi tai permeanssi (Kidesuunta, täyterroin, levyn paksuus)	Tyhjäkäyntikoe,
Ilmaväli	Väärä ilmavälin pituus Aksiaalissuuntainen kohdakkaisuus	Tyhjäkäyntikoe,
Roottori- käämitys	Väärä uramäärä Väärä urakulma Kaasukuplia tai murtumia Väärä yksittäisten levyjen asento Väärä uramuoto tai kannaksen pituus	Oikosulkukoe,

Viat voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. Resistanssi ja eristemittauksiin, joissa saadaan mittaustulokseksi suoraan tarkastettava arvo, esimerkiksi käämityksen tai eristeen resistanssi.
2. Oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeeseen, joissa saadaan mitatun virran ja tehon avulla tietoa moottorin resistansseista ja reaktansseista ja joka vaatii vielä erikseen tulkinnan vian aiheuttajasta.
3. Lämpenemäkoe, jossa tarkastellaan koko moottorin lämmönsiirtoa ja jossa saadut lämpötilakäyrät vaativat tulkinnan vian aiheuttajasta.

Oikosulku-, tyhjäkäynti- ja lämpenemäkokeen tulkintaa on selvitetty tarkemmin seuraavassa luvussa.

## 5. MITTAUSTULOSTEN TULKINTA

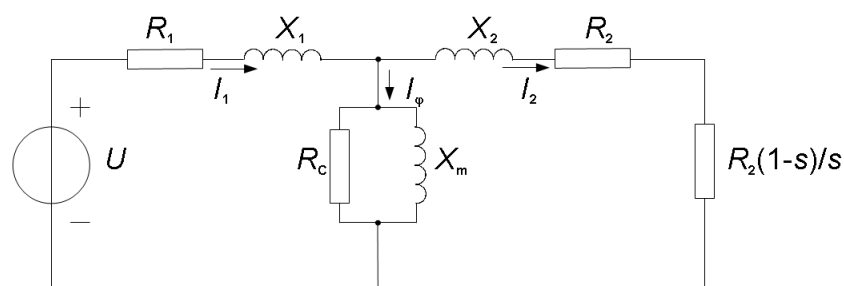
Toisin kuin esimerkiksi eristysvastuskokeessa saatu vastusarvo, lämpenemäkokeessa tai tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeessa saadut tulokset eivät kerro suoraan vian aiheuttajaa. Ne ilmaisevat että tarkasteltava arvo on ylittänyt sille asetetut rajat, mutta se mistä tämä rajojen ylitys johtuu, vaatii tulkintaa. Toisin sanoen ne eivät mittaa suoraan tarkasteltavan komponentin ominaisuuksia, vaan vikojen vaikutusta esimerkiksi roottorikäimityksen impedanssiin ja sen vaikutusta moottoriin syötettävään virtaan. Useat eri viat vaikuttavat hyvin samalla tavalla näihin arvoihin ja tästä syystä tulkinta ja oikean vian löytäminen saattaa olla haastavaa.

Tässä luvussa pyritään hahmottamaan, kuinka mittaustuloksia tulkitsemalla viat pystytään lajittelemaan moottorin eri komponenteille. Luvussa käydään läpi tyhjäkäyntikoe ja oikosulkukoe, joiden tulkinta vaatii moottorin resistanssien ja reaktanssien tuntemista sekä lämpenemäkoe, joka vaatii koneen lämpövirran, lämpötilajakautuman ja jäähtymisen tuntemisen.

### 5.1. Tyhjäkäyntikokeen sijaiskytkentä ja tulkinta

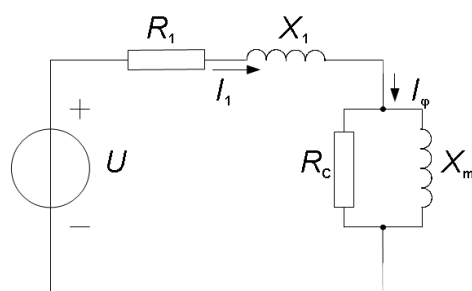
Tyhjäkäyntikokeen tulkintaa voidaan helpottaa sijaiskytkennän avulla. Kuvassa 18 on esitetty oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä, missä  $R_1$  on staattorikäimityksen resistanssi,  $X_1$  staattorikäimityksen hajavuoreaktanssi,  $R_2$  roottorikäimityksen resistanssi,  $X_2$  roottorikäimityksen hajavuoreaktanssi,  $R_c$  rautahäviöresistanssi,  $X_m$  magnetointireaktanssi,  $I_1$  staattorivirta,  $I_2$  roottorivirta ja  $I_\phi$  magnetointivirta. Yhtälö  $R_2(1-s)/s$  kuvaa kuorman synnyttämää resistanssia.

Sijaiskytkennän mukaan koneeseen syötettävä virta jakautuu magnetointivirraksi ja roottorivirraksi. Samoin impedanssit jakautuvat roottorin sekä magnetoinnin ja rautahäviöiden kesken. Virran jakautumiseen vaikuttaa jättämä, joka ääriarvoissaan lähestyy nollaa ja yhtä, jolloin roottoriresistanssin komponentin  $R_2(1-s)/s$  arvo liikkuu lähes nollan ja äärettömän välillä.



**Kuva 18.** Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä.

Oikosulkumoottorin ollessa tyhjäkäynnissä jättämän  $s$  arvo lähestyy nollaa, jolloin kuormaa kuvaavan resistanssin yhtälön  $R_2(1-s)/s$  arvo lähestyy ääretöntä. Tyhjäkäyntikokeelle sijaiskytkennästä voidaan tällöin poistaa roottori-impedanssia kuvaava rinnankytkentä, kuvan 19 mukaisesti.



**Kuva 19.** Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä tyhjäkäyntikokeen aikana, jolloin tyhjäkäyntivirta  $I_0 = I_1 \approx I_\phi$ .

Kuten kuvasta voidaan havaita, tyhjäkäyntikokeessa mitataan pääasiassa rautahäviöitä sekä magnetointi- ja hajavuota. Toki myös roottorin impedanssilla saattaa olla merkittävä vaikutus, jos moottorille syntyy tarpeeksi kuormaa tuuletus- tai kitkahäviöistä. Kun huomioidaan että staattori-resistanssin  $R_1$  arvo tarkistetaan tyhjäkäyntikoetta ennen vastusmittauksella ja että hajareaktanssiin  $X_1$  ei juuri voida vaikuttaa, lukuun ottamatta staattoriurien ja hampaiden muotoilua ja urakiilojen materiaalia. Voidaan olettaa että koe mittaa pääasiassa magneetti-piirin permeanssia ja rautahäviöitä.

Vertaamalla kaikista kolmesta vaiheesta mitattuja virran ja tehon arvoja, nähdään onko vuon kulkureitin permeanssi tai rautahäviöt jakaantuneet symmetrisesti. Staattoripaketin ja permeanssin tapauksessa myös mahdollisesti ilmavälin suhteen. Tosin permeanssin jakautumisen pitäisi olla aina melko symmetristä kidesuuntamattomassa teräslevyssä.

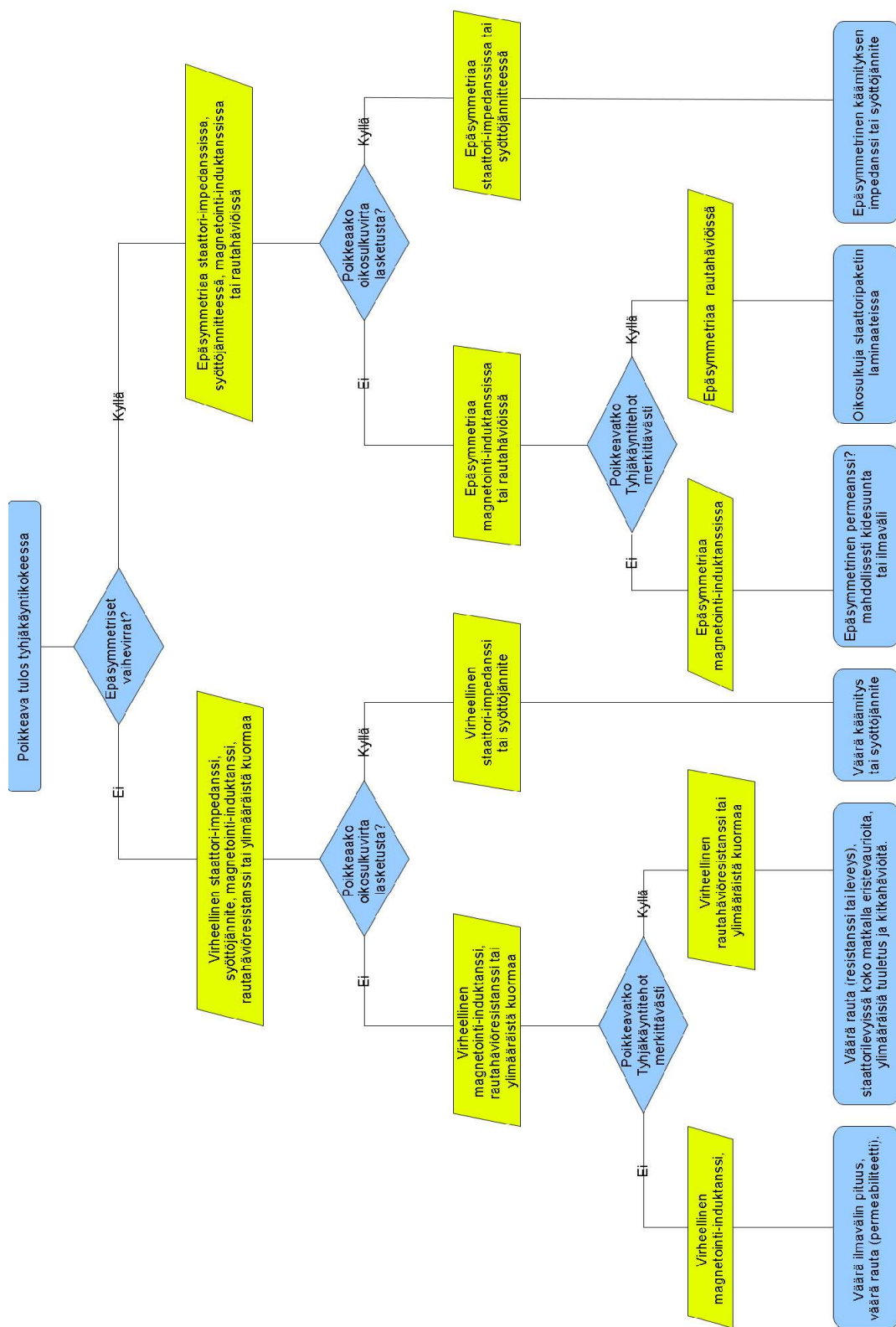
Kun tarkastellaan kuvan 20 oikosulkukokeen sijaiskytkentää, voidaan havaita että esimerkiksi rautahäviöt  $R_c$  voidaan erottaa kuparihäviöistä  $R_1$  vertailemalla oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeen tuloksia. Kuvien 18 ja 20 mukaisesti kasvaneiden kuparihäviöiden tulisi vaikuttaa myös oikosulkukokeen tuloksiin, kun taas rautahäviöiden pääasiassa tyhjäkäyntikokeen tuloksiin.

Taulukkoon 7 on kerätty luvussa neljä esiteltyä tyhjäkäyntikokeessa havaittavat viat. Lisäksi taulukkoon on merkitty ne sijaiskytkennässä esiintyvät komponentit, joihin kyseisellä vialla on vaikutusta sekä ne oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeen tulokset, joihin muutokset vaikuttavat. Esimerkiksi staattorilevyjen eristevauriot mahdollistavat staattorilevyjen väliset pyörrevirrat, jotka näkyvät yksivaiheisessa sijaiskytkennässä rautahäviöresistanssin  $R_c$  pienenemisenä ja täten oikosulkuvirran  $I_0$  ja -tehon  $P_0$  kasvuna.

**Taulukko 7.** Tyhjäkäyntikokeessa havaittavia vikoja ja niiden vaikutuksia mittaustuloksiin sekä sijaiskytkentään.

Moottorin komponentti	Vika	Vaikutus sijaiskytkentään	Vaikutukset Mittaustuloksiin
Rautapiiri	Staattorilevyjen eristevauriot	$R_c$	$I_0 + P_0$
	Väärä permeanssi	$X_m$	$I_0$
	Väärä resistanssi tai leveys	$R_c$	$I_0 + P_0$
	Kidesunnattu levy	$X_m$	$I_0$
Ilmaväli	Väärä ilmavälinpituus	$X_m$	$I_0$
Muut	Tuuletus ja kitkahäviöt	$Z_2$	$I_0 + P_0$
	Epäsymmetrinen syöttöjännite	$U$	$I_0 + P_0$
	Staattoriresistanssi	$R_1$	$I_0 + P_0$

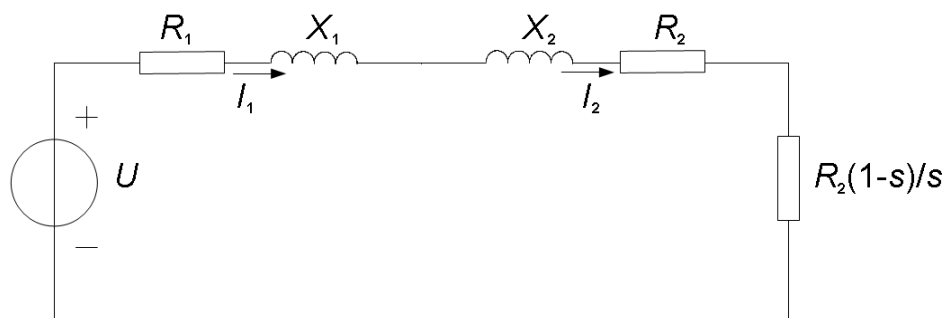
Luvun alkuosan mukaan tyhjäkäyntikokeessa on kuusi syötettä:  $I_0$ ,  $I_0\%$ ,  $P_0$ ,  $P_0\%$  ja  $I_{km}$ , ja seitsemän vastetta  $R_1$ ,  $U$ ,  $R_c$ ,  $X_m$ ,  $R_1$ ,  $U\%$ ,  $R_c\%$ ,  $X_m\%$  sekä  $Z_2$ , jos oletetaan että  $R_1$  karsitaan resistanssimittauksella. Prosenttimerkki yksikön takana kuvaa epäsymmetriaa mitattavassa virrassa tai tehossa, eli  $U\%$  on epäsymmetrinen syöttöjännite,  $R_c\%$  on vaiheiden välille epäsymmetrisesti jakautunut rautahäviö jne. Tyhjäkäyntikokeen tulkinnasta voidaan nyt piirtää kuvan 20 mukainen vuokaavio.



Kuva 20. Vuokaavio tyhjäkäyntikoeksessa havaittavien vikojen lajittelusta.

## 5.2. Oikosulkukokeen sijaiskytkentä ja tulkinta

Kuten edellä, myös oikosulkukokeen tulkinnessa voidaan käyttää apuna kuvan 17 sijaiskytkentää. Oikosulkukokeessa jättämä on yksi, jolloin kuorman resistanssi  $R_2(1-s)/s$  saa arvoksi nollan. Kun vielä oletetaan että roottorikämmityksen impedanssi on huomattavasti pienempi kuin rautahäviöiden ja magnetointireaktanssin rinnankytkennän muodostama impedanssi, voidaan jättää vuon kulkureitin impedanssi huomioimatta ja tarkastella vain roottori-impedanssia. Kytkentä voidaan yksinkertaistaa kuvan 21 kaltaiseksi. Tällöin oikosulkuvirta on, kuten edelläkin, riippuvainen staattori-resistanssista  $R_1$  ja staattorireaktanssista  $X_1$ , mutta ennen kaikkea roottorin resistanssista  $R_2$  ja reaktanssista  $X_2$ .



**Kuva 21.** Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä oikosulkukokeen aikana, jolloin oikosulkuvirta  $I_{km} = I_1 \approx I_2$ .

Vertaamalla kaikista kolmesta vaiheesta mitattujen virtojen arvoja keskenään, nähdään onko roottorikämmityksen resistanssin ja reaktanssin jakautuminen symmetristä. Oikosulkukokeessa roottori-impedanssin symmetrian tarkastelua helpottaa vielä se, että roottorin asentoa voidaan muuttaa kokeen aikana, ja täten seurata esimerkiksi rikkinäisen sauvan aiheuttaman virranmuutoksen matkaa vaiheesta toiseen roottorikulman muuttuessa. Taulukkoon 8 on kerätty luvussa neljä esiteltyt oikosulkukokeessa havaittavat viat,  $P_k$  on oikosulkuteho.

Taulukkoja 7 ja 8 tarkastellessa näyttää siltä, että aina kun oikosulkukoe antaa virheellisen tuloksen, on vika roottorissa ja taas tyhjäkäyntikokeen tapauksessa staattorissa, luukun ottamatta staattori-impedanssia ja epäsymmetristä tai virheellistä syöttöjännitettä. Kuitenkin jos roottori on sorvattu alimittaiseksi, se vaikuttaa sekä ilmävälin pituuteen,

että roottoriurien yläosan kannaksen leveyteen. Koska täällä on vaikutusta sekä magneetointi-impedanssiin että roottori-impedanssiin, saattaa alimittainen roottori näkyä molemmilla koestuksissa. Lisäksi permeanssin muutokset saattavat kasvattaa hajavoita ja täten heikentää roottoriin indusoituvaa jännitettä, Pyrhösen (1995:165) mukaan tämän vaikutus on kuitenkin vähäinen.

**Taulukko 8.** Oikosulkukokeessa havaittavia vikoja ja niiden vaikutuksia mittaustuloksiin sekä sijaiskytkennän sähköisiin arvoihin.

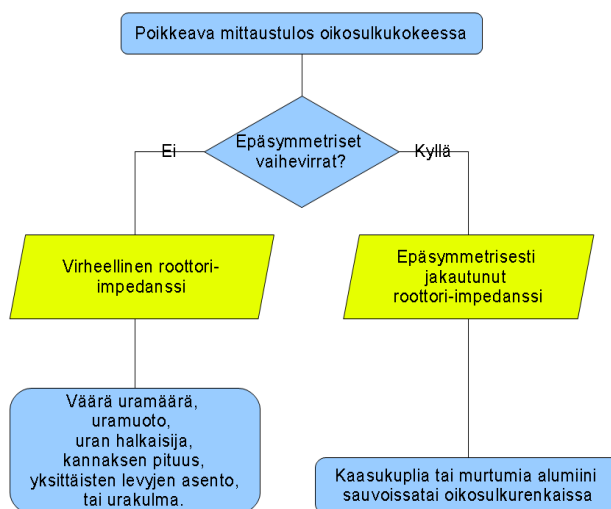
Moottorin komponentti	Vika	Vaikutus sijaiskytkentään	Vaikutukset Mittaustuloksiin
Roottori-käämitys	Väärä uramäärä	$Z_2$	$I_{km} + P_k$
	Väärä uramuoto	$X_2$	$I_{km}$
	Väärä uran halkaisija	$R_2$	$I_{km} + P_k$
	Kaasukuplia tai murtumia alumiinissa	$R_2$	$I_{km} + P_k$
	Väärä kannaksen pituus	$X_2$	$I_{km}$
	Väärä levyjen asento	$R_2$	$I_{km} + P_k$
	Väärä urakulma	$R_2$	$I_{km} + P_k$

Taulukossa listatulla urakulman muutoksella on mahdollisesti merkittäviä vaikutuksia riippuen esimerkiksi uralukukombinaatioista. Toisaalta kasvanut urakulma heikentää hieman roottoriin indusoituvaa virtaa ja kasvattaa sauvan resistanssia, jolloin se saattaa näkyä oikosulkuvirran muutoksena.

Luvun aikaisemman osan mukaan oikosulkukokeen syötteitä on ainoastaan kaksi:  $I_{km}$  ja  $I_{km\%}$ . Vasteitakin on ainoastaan kaksi:  $Z_2$  ja  $Z_{2\%}$ . Käytännössä, kun viat staattori-impedanssissa ja syöttöjännitteessä on saatu suljettua pois, kokeessa mitataan virhettä häkkikäämityksen impedanssissa. Tällöin oikosulkukokeen vuokaavio kutistuu tyhjäkäyntikokeen vuokaavioon verrattuna hyvin lyhyeksi. Oikosulkukokeen vuokaavio on esitetty kuvassa 22. Käytännössä roottorissa voi olla taulukon 8 mukaan melko monenlaisia vikoja, mutta oikosulkukokeella ne lajitellaan vain kahteen luokkaan, symmetrisiin tai epäsymmetrisiin vikoihin.



Kokeen kannalta on harmillista, ettei vikoja voida varmistaa helposti roottorin ulkoisella tarkastuksella. Esimerkiksi uramuodon tarkistus saattaa vaatia roottorilevyjen ja alumiinin vahingoittamista ja viedä huomattavasti aikaa. Roottorin valmistuksesta riippuen saattaa kuitenkin olla mahdollista laskea urien määrä, mitata urakulma tai tarkistaa ovatko urat avoimet vai suljetut. Toinen huomio on, ettei painevaletuissa alumiiniroottoreissa havaittavia vikoja pystytä useimmiten korjaamaan vaan joudutaan hankkimaan uusi roottori ja tästä syystä vian syytäkään ei aina edes kannata varmistaa.



**Kuva 22.** Oikosulkukokeen vuokaavio.

Oikosulkukoe mittaa roottorikäymistä vain kun jättämä on yksi. Roottoriuramuoto kuitenkin vaikuttaa impedanssin lisäksi myös virranhaantumiseen ja sitä kautta roottori-impedanssin arvoon eri jättämän arvoilla (sijaiskytkennässä  $R_2(1-s)/s$ ). Tästä syystä on periaatteessa mahdollista, että koe voitaisiin läpäistä virheellisellä roottoriuramuodolla, joka havaittaisiin vasta kun konetta käytettäisiin nimelliskuormalla, esimerkiksi lämpenemäkokeessa.

### 5.3. Moottorin lämpenemä ja lämpenemäkoe

Oikosulkumoottorin lämmönsiirto riippuu häviöiden määrästä ja syntymispaikasta, lisäksi moottorin muodoista ja mitoista sekä jäädytystavasta. Tulokinnassa moottori oletetaan jäähtyvän akseliin kiinnitettävän puhaltimen avustuksella, joka onkin selvästi

yleisin moottorin jäähdytystapa. Muita jäähdytystapoja ovat erillistuuletin, joita käytetään erityisesti hitaasti pyörivissä moottoreissa ja nestejäähdytys, jota käytetään erityisesti suuritehoisissa moottoreissa (Boldea 2004: 306, 326).

Oikosulkumoottorissa on kolme lämpenemän lopputulokseen merkittävästi vaikuttavaa, mahdollisesti vikaantuvaa tekijää: lämpövirran määrä, ilmajäähdytyksen tehokkuus ja moottorin lämmönjohtumisen tehokkuus. Näitä käsitellään seuraavassa kolmessa luvussa.

### 5.3.1. Lämpövirran määrä

Lämpövirta muodostuu moottorin häviöistä, joiden tunteminen moottorin eri osissa helpottaa lämpenemäkokeen tulkitsemista. Taulukkoon 9 on kerätty oikosulkumoottorin häviöt Pyrhösen (1995: 273) ja Emadin (2005: 42–43) mukaan sekä IEC 60034-1 standardin mukaisesti mitattu tulos. Arvot on esitetty prosentteina moottorin kokonaishäviöistä.

**Taulukko 9.** Neljän erikokoisen moottorin häviöiden jakautuminen.

	Pyrhönen	Emadi	Emadi	Mitattu
Napaparimäärä	1	2	2	2
Teho (kW)	4,7	3,7	149	165
Hyötysuhde (%)	85	83	93	95
Staattorin $RI^2$ häviöt (%)	46	40	30	33
Roottorin $RI^2$ häviöt (%)	32	20	16	28
Rautahäviöt (%)	12	29	15	16
Kitkahäviöt (%)	7	4	10	12
Lisähäviöt (%)	3	7	29	11

Tulokset noudattavat jokseenkin samaa linjaa, tosin 149 kW:n moottorin lisähäviöt ovat epäilyttävän suuret. Jokaisella moottorilla kuitenkin staattorihäviöt näyttävät olevan merkittävimmät, pienissä koneissa luokkaa kaksi viidesosaa ja isommissa noin kolmannes.

### 5.3.2. Jäähdytysilman kulku

Pakotetulla konvektiolla, roottorin siivekkeillä ja n-pään puhaltimella on merkittävä osuus koneen jäähdytyksessä. D-pää (drive end) tarkoittaa moottorin päätä, josta se kytketään kuormakoneeseen ja N-pää (non drive end) tarkoittaa päätä johon tuuletin yleensä kiinnitetään, esimerkiksi kuvassa 1.

Noin 20 % kääminpäiden lämmöstä kulkeutuu konvektiolla, roottorinpäissä olevien tuuletinsiipien avustamana, runkoon ja laakerikilpiin (Boldea 2004: 352, 347). Rungon pinnassa ja n-pään laakerikilvessä taas akseliin kiinnitetyn puhaltimen avustama konvektio on pääasiallinen lämmönsiirtymistapa, jota avustaa johtuminen akselinkautta kuormakoneeseen sekä mahdollisesti laipan ja jalkojen kautta kiinnitysalustaan. Koneen jäähdytyksen kannalta näiden vaikutukset ovat hieman erilaiset. N-pään tuuletin vaikuttaa koko moottorin lämpötilaan ja lämmön siirtoon moottorista ympäristöön. Roottoripäiden tuulettimet taas vaikuttavat lämmön jakautumiseen moottorin sisäisissä komponenteissa.

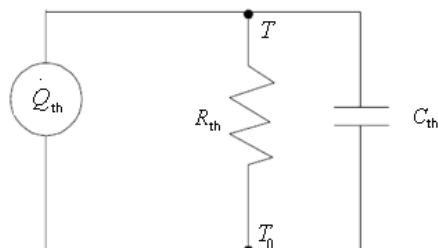
Lämmönsiirron vikaantumisen kannalta huomioitavia tekijöitä on konvektion lämmönsiirtokerroin  $h$  joka yhtälöiden 21 ja 23 mukaan on suoraan verrannollinen jäähdytysaineen nopeuden neliöjuureen. Ilman nopeuteen vaikuttaa:

- Lapojen määrä ja muoto roottorin päissä sekä akseliin kiinnitettyssä puhaltimessa.
- Ilman esteetön kulku moottorin pinnassa sekä kääminpäiden ympäristössä ja rungon ja kilpien sisäpinnalla.

Akseliin kiinnitetyn puhaltimen ja moottorin pinnan tarkastus voidaan suorittaa silmämääräisesti kokoonpanon jälkeenkin. Roottorin tuulettimen ja moottorin sisäpinnan ominaisuuksia ei päästä tarkastelemaan moottoria purkamatta.

### 5.3.3. Johtuminen ja lämpöresistanssit

Moottorin lämmönjohtumisen ja lämpöresistanssin hahmottamisessa voidaan käyttää apuna lämmönsiirtymisen sijaiskytkentää. Moottorin lämmönjakautumista voidaan kuvata yksikertaisimmillaan kuvan 23 mukaisella piirillä.



**Kuva 23.** Johtumisesta aiheutuva moottorin lämmönsiirtymisen sijaiskytkentä (Boldea 2004 12: (335)).

Lämpökapasitanssia  $C_{th}$  lukuun ottamatta muuttujat ovat lämmönjohtumista kuvaavan yhtälön 18 mukaisia. Lämpökapasitanssi saadaan kappaleen massan  $M$  ja ominaislämpökapasiteetin  $c$  avulla

$$C_{th} = Mc. \quad (31)$$

Lämpöresistanssin ja -kapasitanssin avulla moottorille saadaan myös lämpenemisaikavakio

$$\tau_{th} = R_{th} C_{th}, \quad (32)$$

joka ilmaisee moottorin lämpenemisajan (Boldea 2004: 335–336). Kuvan 22 ja yhtälön 32 mukaan, lämpenemisaikaan vaikuttavat siis myös kappaleen massa ja ominaislämpökapasiteetti, mutta loppulämpötilaan ainoastaan lämpöresistanssi ja lämpövirta.

Vikaantumisen kannalta kappaleen virheellinen massa tai ominaislämpökapasiteetti vaatisi vääränmuotoisen tai väärän materiaalin joka todennäköisesti havaittaisiin oikosulkutai tyhjäkäyntikokeessa. Toisaalta väärällä lämpökapasiteetilla ei olisi muutenkaan juuri vaikutusta moottorin vikaantumiseen koska se ei vaikuta loppulämpötilaan. Tällöin jäl-

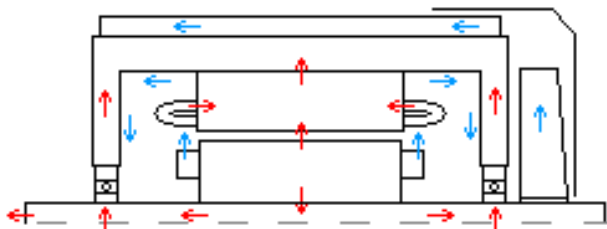
jelle jää lämpövirran määrä ja lämpöresistanssit. Luvun 4.6 mukaan liitoskohdat ovat, vikaantumisen kannalta, merkittävimpiä lämpöresistanssin synnyttäjiä. Liitoskohtia on väleillä:

- roottorikäänitys, roottoripaketti, akseli,
- akseli, laakeri, laakerikilpi ja
- staattorikäänitys, staattoripaketti, runko.

Näiden lisäksi staattori- ja roottoripakettien eristettyjen levyjen välillä on lämpöresistanssia, joka heikentää lämmön siirtymistä aksiaaliseen suuntaan. Tällä on merkitystä jonkin verran kääminpäistä poistuvan lämmön siirrossa.

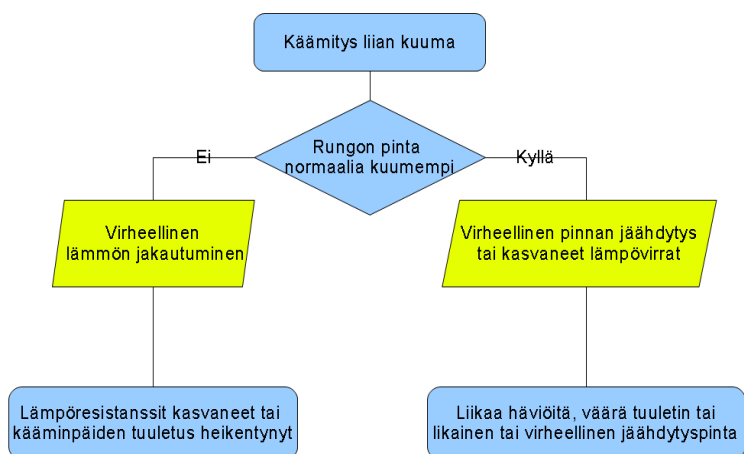
#### 5.3.4. Lämmön kulku ja lämpenemäkokeen tulkinta

Lämmön kulkuun ja jakautumiseen moottorin sisällä vaikuttavat roottorisiipien aiheuttama konvektio ja johtuminen koneen osien läpi ja välillä. Ehjän moottorin korkein lämpötila sijaitsee yleensä kääminpäissä. On havaittu, että ainakin pienitehoisissa oikosulkumoottoreissa, noin 80 % kääminpäiden lämpöhäviöistä kulkeutuu johtumalla urissa oleviin johtimiin ja sitä kautta staattoripakettiin ja runkoon. Loput noin 20 % lämmöstä kulkeutuu konvektiolla, roottorinpäissä olevien tuuletinsiipien avustamana, runkoon ja laakerikilpiin. Lisäksi on havaittu että 60–70 % roottorihäviöiden synnyttämästä lämmöstä kulkeutuu ilmavälin yli staattoripakettiin (Boldea 2004: 326, 352, 347). Moottorin lämpönieluinä toimivat rungon pinnat ja laakerikilvistä erityisesti n-pään kilpi sekä akseliin kytketty kuorma, laippa ja jalat. Luvun aikaisemman osan perusteella saadaan jäähditysilmalle ja lämpövirralle kuvan 24 mukaiset reitit.



**Kuva 24.** Poikkileikkaus, jossa lämmön konvektion ja ilman kulkusuunnat. Laakereiden kitkan synnyttämää lämpöä ei ole huomioitu.

Nyt voidaan kerätä vian tulkintaan tarvittavat tiedot. Koetuksessa on kaksi syötettä: rungon ja kääminpäiden lämpötila ja kaksi vastetta: kasvaneet lämpöresistanssit tai heikentynyt kääminpäiden tuuletus ja kasvaneet lämpövirrat tai heikentynyt rungon tuuletus. Tämän perusteella voidaan piirtää kuvan 25 vuokaavio.



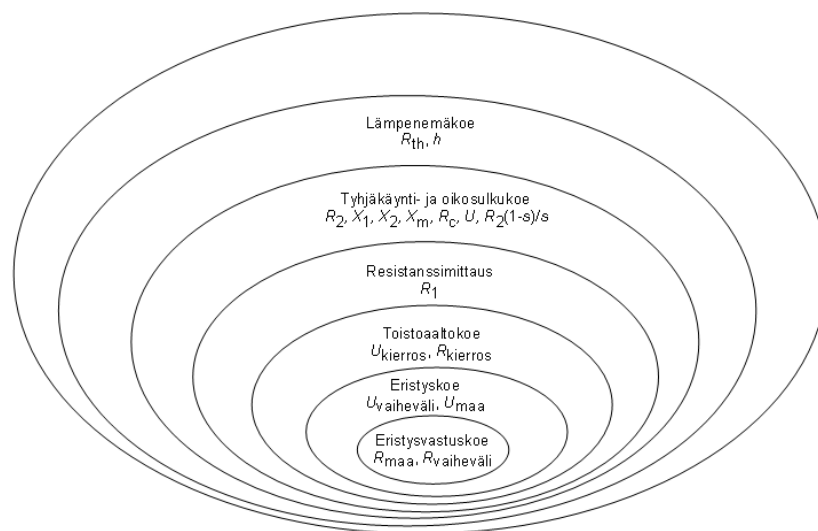
**Kuva 25.** Lämpenemäkokeen vuokaavio.

## 6. POHDINTA

Koestuksessa havaitaan jokin indikaatio mahdollisesta viasta, jonka seurauksena tarkastellaan mitattavia suureita. Osassa mittauksissa tarkastellaan vain yhtä suuretta, osassa useampia, tietyt suureiden kombinaatiot viittaavat tiettyyn vikaan, siinä mielessä jonkinlainen matriisi olisi kuvaavampi työkalu vian selvityksessä.

Edellä mainittu indikaatio on jonkin mitattavan suureen arvo, joka ylittää sille sovitun rajan. Rajat voivat olla konetyyppikohtaisia esim. tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeessa ne riippuvat useasta tekijästä napapariluvusta, tehosta, hyötysuhteesta yms., eristeissä taas niihin vaikuttaa pääasiassa moottorin nimellisjännite.

Koestusta voisi ajatella tapahtumana, jossa moottorilla on aluksi tilana ehjä, tai mikä tahansa sille mahdollinen vika. Koska vikaa ei suoraan voida mitata, tarkastellaan sen vaikutuksia; tässä tapauksessa sähkön ja lämmönsiirron suureita. Tätä joukkoa, johon kuuluu moottorin kaikki tilat ehjästä mihin tahansa vikaan voidaan pienentää koestusten avulla. Jokainen koestus karsii osan vaihtoehdoista pois ja helpottaa siten seuraavan koestuksen tulkintaa, kuvan 26 mukaisesti. Kaikki koestukset läpäistyään moottori voidaan todeta ehjäksi, sen perusteella ettei missään tarkasteltavassa suureessa havaittu poikkeamaa.

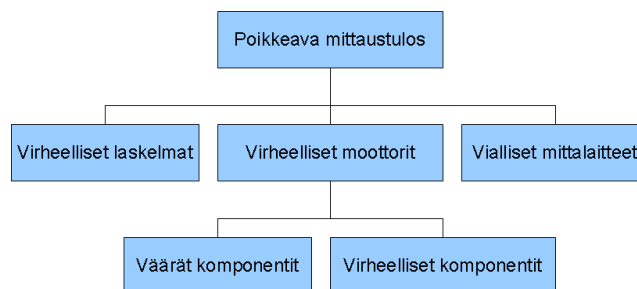


**Kuva 26.** Moottorin viat ja koestukset sekä niissä mitattavat suureet.

Kuvan mukaisesti jokainen aikaisemmin tehty koe vaikuttaa tai saattaa vaikuttaa aina tulevan tulkintaan mutta ei toisinpäin. Virheellinen maaeriste vaikuttaa eristyskokeen, toistoaltokokeen, mahdollisesti resistanssimittauksen, tyhjäkäyntikokeen jne. tuloksiin, mutta esim. tyhjäkäyntikokeessa havaittava magnetointireaktanssin tulos ei vaikuta eristysvastuskokeen tulkintaan.

Mitä enemmän suureita on tarkastettu, sitä tärkeämpää on että aikaisemmat kokeet on tulkittu oikein. Tarkasteltava kokeen tulkinta pitää aina sisällään sitä aikaisempien kokeiden tulkinnan.

Moottorille koestuksista saatava poikkeava mittaustulos voi johtua moottorille laskettujen arvojen virheellisyydestä, viallisesta mittalaitteesta tai virheellisestä moottorista. Virheelliset moottorit voidaan vielä jakaa moottoreihin joissa on ehjät mutta kyseiselle moottorille väärät komponentit sekä moottoreihin joissa on virheellisiä komponentteja. Virheelliset komponentit voitaisiin vielä jakaa virheellisesti valmistettuihin ja tuotantolinjalla vaurioituneisiin. Poikkeavan mittaustuloksen eri syyt on esitetty kuvassa 27. Jos tulkinta kyetään suorittamaan suoraan tuotantolinjalla, kyetään kuvassa esitetyistä vioista kaikki, lukuun ottamatta laskettujen arvojen virhettä, myös korjaamaan tuotantolinjalta.



**Kuva 27.** Vikojen jaottelu eri aiheuttajiin

Koestuksen tulkintaa vaikeuttaa se kuinka montaa suuretta koestuksessa mitataan. Tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeessa mitattavia suureita on yhteensä 15, joista osa voidaan selvittää suoraan toisella kokeella ja osa vaatii molempien kokeiden tulokset. Tyhjäkäyntikokeen tulkinnassa on useita syötteitä ja tulkinnaksi saadaan melko tarkasti jokin



tietty vika, mutta tulkinta on melko vaikeaa. Oikosulkukokeen tulkinnassa taas on vähän syötteitä ja tulkinta on helppoa, mutta vika voidaan rajata ainoastaan melko epämääräisesti. Toisaalta laaduntarkkailun kannalta on kumpikin tärkeää; se että vialliset komponentit havaitaan ja se että vian aiheuttaja saadaan selville.

Työssä ei ole pohdittu päällekkäisiä vikoja, jos tarkastellaan kuvan mukaisien suureiden eri kombinaatioita, saadaan  $2^{13}-1 = 8191$  eri vaihtoehtoa. Käytännössä tulkinta suoritetaan kuitenkin aina yhdessä kuvan 26 kerroksessa, eli esimerkiksi eristeviat havaitaan jo aikaisemmin, eivätkä ne siten vaikeuta oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeen tuloksia. Täten tulkintaa voi vaikeuttaa kerrallaan enintään tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeen  $2^7 - 1 = 127$  eri vaihtoehtoa. Jos oletetaan että vikoja olisi enintään kaksi kerrallaan, saadaan  $7! / (2! 5!) + 7 = 28$  eri kombinaatiota.

Lopuksi, vaikka työn alussa teoriaosuudessa käsiteltiin myös värinämittauksia sekä vääntömomenttia, niistä ei kuitenkaan tehty tarkempaa analyysiä. Värinäspektrin analyysi perustuu pitkälle taulukon 2 laskukaavoihin ja tästä syystä vuokaavio ei olisi kovinkaan käytännöllinen. Esimerkiksi Excel-tili, johon syötetään moottorin arvot ja joka sitten laskee taajuuksia taulukon 2 kaavojen perusteella, saattaisi olla tilanteeseen käytännöllisempi. Vääntömomenttikäyrän muoto riippuu taas kuvan 7 mukaisesti suuressi urakombinaatiosta sekä myös roottorin urakulmasta. Käytännössä virheellinen urakombinaatio ja mahdollisesti myös urakulma näkyisi todennäköisesti myös tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeessa.

## 7. YHTEENVETO

Moottorille suoritetaan valmistuksen aikana sille valittuja koestuksia, joissa tarkistetaan asettuvatko sen tietyt sähköiset, mekaaniset ja lämmönsiirron suureet niille valittujen rajojen sisäpuolelle. Vikojen analysointi suoritetaan kun saadaan jonkin mittausarvon avulla indikaatio viasta. Tämän jälkeen tarkistetaan mitkä kaikki koestuksessa tarkistettavat mittausarvot ovat muuttuneet ja suoritetaan niiden avulla analyysi poikkeuksellisen mittaustuloksen syystä. Lopuksi korjataan vian aiheuttaja ja mahdollisesti suoritetaan koestus uudestaan. Kyseinen suoritus vaatii ensimmäiseksi vian havaitsemisen ja toiseksi tulosten tulkinnan.

Tässä työssä käsiteltiin tarkemmin oikosulkukoetta, tyhjäkäyntikoetta ja lämpenemäkoetta, joiden tulkinnasta tehtiin vuokaavio. Tyhjäkäyntikokeen vuokaavio oli laajin, johtuen useasta tarkasteltavasta syötteestä jolloin vuokaaviosta ja vian tulkinnasta tulee monimutkainen. Vian syy saadaan kuitenkin rajattua melko tarkasti. Oikosulkukokeen tulkinnassa taas vasteita on vähän, jolloin vuokaavio jää pieneksi, eikä myöskään vian aiheuttajaa voida rajata kovin tarkasti. Samalla tavoin myös lämpenemäkokeen vuokaaviossa on vähän syötteitä. Lämpenemäkokeessa ei kuitenkaan ole useita mahdollisuuksia vian aiheuttajiksi, joten tulkinta on melko helppoa ja myös vian syy saadaan rajattua melko tarkasti. Toisaalta voidaan pohtia onko tärkeämpää, että pystytään löytämään yksittäisen satunnaisen vian alkuperäinen syy vai riittääkö, että vika kyetään rajoittamaan tiettyyn komponenttiin, joka tämän seurauksena voidaan vaihtaa.

Mahdollisesti tuotannossa käytettävä vian analyysi olisikin mahdollisesti parempi, jos keskityttäisiin vian tarkan etsimisen sijaan rajaamaan ainoastaan viallinen komponentti, jonka jälkeen voidaan nopeasti tilata korvaava. Vika kuitenkin uusiutuisi, jos moottoriin olisi alun perinkin tilattu väärä komponentti tai jos komponenttien tuotannossa tapahtuisi jokin systemaattinen virhe. Vian analyysissä on toinenkin funktio vian korjaamisen lisäksi: vian aiheuttajan löytäminen ja korjaaminen.

Tuotannossa tehtävän vika-analyysin kannalta on huomioitava myös moottorin suureille asetettavien raja-arvojen virheet, eli moottorin arvojen laskentaan käytettävän mallin tuottamat virheet. Näitä voidaan havaita tilastollisesti ja tarkentaa käytännössä mitattu-

jen arvojen avulla. Käytännössä koestajien pitäisi kyetä ainakin erottamaan koneille virheellisesti lasketut tarkistusarvot todellisista moottorivioista, jotta työssä tehdyistä vuo-kaavioista olisi tulkinnan yhteydessä apua ja jotta sähkösuunnittelijoiden kuormitusta voitaisiin pienentää.

Lisäksi voitaisiin pohtia moottorin eri vikojen ilmenemistä. Tietyn tyyppisiä vikoja havaitaan viikoittain, kun taas esimerkiksi tapauksia joissa on useita vikoja päällekkäin syntyy harvoin. Miten voidaan nopeasti ja luotettavasti erotella rutiiniviat erikoisemmista, jotka saattavat vaatia muita kokeita tai tarkempaa analysointia?

Edelliseen liittyen voisi pohtia, olisiko kannattavaa alkaa tilastoida esimerkiksi rutiinikoestuksissa havaittavia mittauspoikkeamia ja niistä analysoitavia vikoja. Tällä kyettäisiin mahdollisesti helpottamaan vikojen analyysiä sekä sitä voisi käyttää myös apuna kun tehdään muutoksia tuotantolinjaan, vaihdetaan alihankkijaa tms.

## LÄHDELUETTELO

- Beckley, Philip (2002). *Electrical Steels for Rotating Machines*. Glasgow: Bell & Bain Ltd. 313 s. ISBN 0-85296-980-5.
- Boldea, Ion & Syed A. Nasar (2001). *The Induction Machine Handbook*. Lontoo: CRC Press LLC. 968 s. ISBN 0-849-30004-5.
- Cengel, Yunus A. (2003). *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2. Painos. New York: McGraw-Hill Companies Inc. 933 s. ISBN 0-07-115150-8.
- Chapman, Stephen J. (2004). *Electric Machinery Fundamentals*. 4. Painos. Iso Britannia: McGraw-Hill Education -Europe. 746 s. ISBN 0-07-115155-9.
- Emadi, Ali (2005). *Energy-Efficient Electric Motors*. 3. Painos. New York: Marcel Dekker Inc. 383 s. ISBN 0-8247-5735-1.
- Fitzgerald A. E., Charles Kingsley Junior & Stephen D. Umans (2002). *Electric Machinery*. 6. Painos. New York: McGraw-Hill Higher Education. 627 s. ISBN 0-07-366009-4.
- Gieras, Jacek F., Chong Wang & Joseph Cho Lai (2006). *Noise of Polyphase Electric Motors*. Boca Raton, Florida: CRC Press. 372 s. ISBN 0-8247-2381-3.
- Heller, Bedrich & Václav Hamata (1977). *Harmonic Field Effects in Induction Machines*. Amsterdam: Elsevier scientific publishing company. 298 s. ISBN 0-444-99856-X.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2000). *IEEE Std 43-2000: IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 21 s. ISBN 0-7381-1925-3.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2004). *IEEE Std 112-2004: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 79 s. ISBN 0-7381-3978-5.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2006). *IEEE Std 1415, IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 58 s. ISBN 0-7381-5565-9.
- International Electrotechnical Commission (2004). *IEC 60034-1 Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*. 137 s.
- International Electrotechnical Commission (2007). *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*. 149 s.
- Jokinen, Tapani (1980). *Sähkökoneen synnyttämä melu*. Espoo: TKK Offset. 101 s. ISBN 951-751-857-9.
- Möller, H. (1930). Über die Drehmomente beim Anlauf von Drehstrommotoren mit Käfigankern. *Elektrotechnik*. 24:6, 401–424.
- National Electrical Manufacturers Association (2006). *NEMA MG 1: Motors and Generators*. Rosslyn, Virginia: National Electrical Manufacturers Association. 654 s.
- Nau, S. L. & H. G. G. Mello (2000). Acoustic noise in induction motors: causes and solutions. *Industry Applications Society 47th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Record of Conference Papers*. 253–263. ISBN 0-7803-6334-5.

O'Donnell, Pat (1985). Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. *IEEE Transactions on industry applications*. 1A-21:4. 853–864. ISSN 0093-9994.

Pyrhönen, Juha (1995). *Pyörivän sähkökoneen suunnitleminen*. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 279 s. ISBN 951-763-868-X.

Stone, Greg C., Edward A. Boulter, Ian Culbert & Hussein Dhirani (2004). *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. New York: John Wiley & Sons, inc. 369 s. ISBN 0-471-44506-1.

Suomalaiset ABB-yhtiöt (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 10. Painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy. 626 s. ISBN 951-99366-0-2.